



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DEL  
RÍO LA GAVIA POR VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL  
DEL CAUDAL”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN SISTEMAS ENERGETICOS  
SUSTENTABLES**

**P R E S E N T A :**

**MANIRA ELENA NARVAEZ SAUCEDO**

**ASESOR DE TESIS:**

**M. en C.A. Boris Miguel López Rebollar**

**COASESOR:**

**Dr. Samuel Tejeda Vega**

**Toluca, Estado de México, Diciembre 2018**





## RESUMEN

La evaluación del recurso natural es indispensable para cualquier tipo de aprovechamiento con la finalidad de mantener un equilibrio, esto se logra a través de la aplicación de distintos métodos, para elegir de este modo el que mejor se adapte a las necesidades y objetivos del proyecto. Los métodos teóricos de cálculo de caudales racional y HMS-SCS, permiten dar un acercamiento al comportamiento del recurso asociados a distintos periodos de tiempo (periodos de retorno). Estos métodos pueden ser evaluados y comparados con otros resultados de análisis de escenarios actuales a partir de aforos en sitio, así como los registros históricos de estaciones hidrométricas.

En este trabajo se aplicaron dos métodos de parámetros concentrados para el cálculo de caudales teóricos: el método racional y el empleado por el software Hec-HMS (The Hydrologic Modeling System ) basado en la metodología propuesta por el SCS (Soil Conservation Service), con la finalidad de comparar y analizar el comportamiento de variables dentro de los mismos para obtener un estudio preliminar de viabilidad energética.

Con los resultados obtenidos a partir de una evaluación preliminar, se realizó la valoración energética del recurso y la proyección de distintos escenarios mediante el modelado de flujo tomando en cuenta la energía específica desarrollada en el río y la potencia aproximada. A partir de ello se realizó una estimación general del comportamiento del flujo y se llevó a cabo el diseño preliminar de la obra de toma para el aprovechamiento energético bajo las condiciones de flujo a superficie libre. Se tuvo como objetivo principal la aceleración del flujo en un canal para generación hidroeléctrica respetando el rango de escurrimiento que permita únicamente el paso por la obra de toma sin afectar las áreas adyacentes al río, y así considerar de medidas ecológicas para la circulación del flujo.

A partir del diseño del canal de obra de toma, se realizó un análisis general de comportamiento del flujo en modelado 3D y análisis en CFD, con la finalidad de observar el desarrollo del flujo y ubicación óptima de la turbina seleccionada posteriormente; así como, aplicar las mejoras necesarias para una primera aproximación del diseño de la obra de toma, principalmente para el canal prototipo de generación hidroeléctrica. El diseño de la obra se realizó bajo los dos criterios de comportamiento de flujo en canales a superficie libre: flujo crítico y flujo uniforme, donde el primero permitió establecer las aproximaciones geométricas de canal; mientras que con el segundo criterio se estableció la pendiente y las condiciones de operación.

Se describe la selección y análisis de generalidades de turbinas comerciales para generación hidroeléctrica de acuerdo al comportamiento del canal diseñado, tomando en cuenta parámetros, de instalación y viabilidad económica.

Finalmente, se expone un estudio de viabilidad ambiental de la instalación de la pequeña central hidroeléctrica. Para ello se exponen de manera general los principales elementos a tomar en cuenta para las diferentes etapas del proyecto, que son: planeación y evaluación, construcción y puesta en marcha, por último, operación y mantenimiento de la instalación. Como resultado principal, se concluye que el proyecto es ambientalmente viable, ya que el sitio escogido para su implementación ocasionaría una mínima perturbación por estar entre áreas de explotación agrícola y ganadera.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1 HIDROGRAFÍA EN MÉXICO.....	1
1.1.1 Regiones hidrológico-administrativas (RHA).....	2
1.1.2 Regiones hidrológicas del Estado de México.....	4
1.1.3 Cuencas y Subcuencas del Estado de México.....	7
1.2 SUBCUENCA LA GAVIA.....	11
1.2.1 Rio La Gavia.....	12
1.2.2 Descripción del río la Gavia y aplicación a la zona de estudio.....	12
1.3 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES.....	14
1.3.1 Estimación de caudales con datos experimentales (in-situ).....	15
1.3.2 Estimación de datos hidrométricos.....	19
1.3.3 Estimación de caudales con métodos hidrometeorológicos y matemáticos.....	20
1.3.4 Sistemas de información geográfica.....	21
1.4 MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS.....	23
1.4.1 HEC-RAS.....	24
1.4.2 Ansys Fluent.....	26
1.5 MICRO Y PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS.....	29
1.6 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....	33
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>36</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	36
2.2 HIPÓTESIS.....	37
2.3 OBJETIVO GENERAL.....	37
2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	37
2.5 EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL RIO LA GAVIA.....	37
2.5.1 Trazado y obtención de propiedades morfométricas de la zona de estudio.....	39
2.5.2 Batimetría para el cauce en estudio.....	42
2.5.3 Datos hidrométricos.....	44
2.5.4 Métodos hidrometeorológicos.....	45
2.5.4.1 Selección de estaciones climatológicas.....	45
2.5.4.2 Análisis y depuración de datos.....	46
2.5.4.3 Aplicación de funciones estadísticas.....	47
2.5.4.4 Curvas IDF (Método de Chen).....	49
2.5.4.5 Método racional.....	51
2.5.4.6 Método SCS-HMS.....	52
2.5.5 Obtención de caudales con aforos en sitio.....	53
2.6 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL RÍO.....	55
2.7 DISEÑO DE OBRA DE TOMA.....	57
2.7.1 Dimensionamiento a flujo Crítico.....	57
2.7.2 Dimensionamiento a flujo uniforme.....	60
2.7.3 Influencia del caudal ecológico en el diseño.....	61
2.7.4 Viabilidad ambiental.....	62
2.8 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN LA OBRA DE TOMA.....	63
2.8.1 Construcción del modelo de flujo del canal.....	64
2.8.2 Modelado de flujo ANSYS.....	64



2.8.2.1	Geometría y fronteras del dominio .....	66
2.8.2.2	Mallado.....	67
2.8.2.3	Configuración de parámetros.....	68
2.9	CARACTERÍSTICAS Y GENERALIDADES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS (79). ....	70
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>71</b>
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>71</b>
3.1	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL .....	71
3.1.1	<i>Parámetros morfométricos de la cuenca de estudio.....</i>	71
3.1.2	<i>Análisis de estaciones hidrométricas .....</i>	72
3.1.3	<i>Resultados de estudio de datos hidrológicos.....</i>	74
3.1.3.1	Método Racional .....	75
3.1.3.2	Método HEC-HMS basado en SCS:.....	77
3.1.4	<i>Aforos mensuales .....</i>	78
3.1.5	<i>Resultados de la Modelación hidráulica.....</i>	80
3.2	ESTIMACIÓN DE ENERGÍA Y POTENCIA EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS .....	86
3.2.1	<i>Resultados de energía y potencia para datos de las estaciones hidrométricas.....</i>	87
3.2.2	<i>Resultados de energía y potencia para datos obtenidos del método racional.....</i>	88
3.2.3	<i>Resultados de energía y potencia para datos obtenidos del método HMS-SCS.....</i>	91
3.2.4	<i>Comparación de métodos para la estimación de viabilidad energética.....</i>	94
3.3	RESULTADOS DE DIMENSIONAMIENTO DE OBRA DE TOMA Y MODELACIÓN 3D. ....	95
3.3.1	<i>Canal de generación y caudales ecológicos.....</i>	95
3.3.1.1	Análisis del canal a flujo crítico Resultado de diseño a flujo critico .....	96
3.3.1.2	Resultado de diseño a flujo uniforme.....	100
3.3.2	<i>Análisis y modelación del canal en 3D. ....</i>	102
3.3.2.1	Resultados canal inicial.....	104
3.3.2.2	Mejora geométrica de las transiciones del canal.....	105
3.3.2.3	Rango de operación a $Tr = 20$ .....	111
3.4	SELECCIÓN DE TURBINA .....	114
3.4.1	<i>Smart free stream, Smart Hydro Power .....</i>	115
3.4.2	<i>River Turbine, Idénergie.....</i>	115
3.5	ESTUDIO DE VIABILIDAD AMBIENTAL.....	116
3.5.1	<i>Justificación.....</i>	117
3.5.2	<i>Preparación del Sitio y Construcción. ....</i>	120
3.5.3	<i>Operación y Mantenimiento.....</i>	124
3.5.4	<i>Abandono del Sitio.....</i>	129
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>130</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>130</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>135</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>142</b>
<b>GLOSARIO .....</b>		<b>162</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa de las regiones hidrológicas-administrativas México, (4).	2
<b>Figura 2:</b> Mapa de las regiones hidrológicas en México, (2).	3
<b>Figura 3:</b> Mapa de las Subcuenca Alta del Río Lerma, (7).	5
<b>Figura 4:</b> Mapa de las Subregiones y cuencas hidrológicas de la Región Hidrológica número 18 Balsas, (12).	6
<b>Figura 5:</b> Mapa de ubicación geográfica de la Región Hidrológica “Pánuco”, (4).	6
<b>Figura 6:</b> Hidrografía del Estado de México, Cuencas y Subcuencas, (5).	9
<b>Figura 7:</b> Mapa de ubicación de la cuenca La Gavia, (17).	11
<b>Figura 8:</b> Mapa de uso de suelo y vegetación Almoloya de Juárez, (18).	13
<b>Figura 9:</b> Mapas de densidad de población y grado de marginación, (6).	14
<b>Figura 10:</b> Esquema de división de franjas en un cauce, método área velocidad, (23).	16
<b>Figura 11:</b> Método volumétrico de medición de caudal, (25).	16
<b>Figura 12:</b> Nomenclatura de las partes del aforador Parshall, (26).	18
<b>Figura 13:</b> Ejemplos de la plataforma gráfica del software ArcGIS, (36).	22
<b>Figura 14:</b> Discretización de una variable, (41).	24
<b>Figura 15:</b> Ejemplo de pantallas del software HEC-RAS, (42).	25
<b>Figura 16:</b> Esquema del tipo de ecuación que se utiliza para llegar a un campo de soluciones con ANSYS-Fluent, (45)	27
<b>Figura 17:</b> Esquema de mallado para la modelación de un sistema ya aislado, (45).	27
<b>Figura 18:</b> Secuencia general para el modelado con CFD, (45).	28
<b>Figura 19:</b> Elementos geométricos con los que se puede crear una malla para la discretización del dominio de una simulación, (45).	29
<b>Figura 20:</b> Esquema de una central de agua fluyente, (53).	30
<b>Figura 21:</b> Bosquejo de una central con embalse, (53).	31
<b>Figura 22:</b> Bosquejo de una central de acumulación por bombeo, (53).	32
<b>Figura 23:</b> Bosquejo de una central mareomotriz, (53).	32
<b>Figura 24:</b> Esquema de condiciones para un proyecto sustentable. (57).	35
<b>Figura 25:</b> Diagrama de flujo para obtención de la variación espacio temporal de la zona.	38
<b>Figura 26:</b> Mapa de ubicación de la Sub-cuenca La Gavia	40
<b>Figura 27:</b> Cuenca y subcuencas trazadas	42
<b>Figura 28:</b> Descripción general de la zona de estudio, estaciones hidrométricas y puntos de aforo.	43
<b>Figura 29:</b> Caracterización de la batimetría Hec-Ras.	43
<b>Figura 30:</b> Nombre y ubicación espacial de estaciones climatológicas.	46
<b>Figura 31:</b> Clasificación de intensidad de lluvia (67).	47
<b>Figura 32:</b> Errores cuadráticos medios entre funciones, para cada estación.	49
<b>Figura 33:</b> Valores del factor R por región, (71).	50
<b>Figura 34:</b> Aforo en la sección hidráulica, (fotografía tomada el 07/02/18)	53
<b>Figura 35:</b> Cálculo de caudal sección-velocidad	54
<b>Figura 36:</b> Características del perfil de río	54
<b>Figura 37:</b> Áreas de sección	55
<b>Figura 38:</b> Elementos de sección de río.	56
<b>Figura 39:</b> Curva de energía específica en función del tirante	58
<b>Figura 40:</b> Características de sección para la para el aprovechamiento hidroeléctrico.	58
<b>Figura 41:</b> Volumen de control de flujo uniforme.	61
<b>Figura 42:</b> Características de la obra de toma, vista frontal.	64
<b>Figura 43:</b> Dominio de flujo para modelado	67
<b>Figura 44:</b> Desratización del dominio	68
<b>Figura 45:</b> Calidad y número de elementos de malla	68
<b>Figura 46:</b> Niveles de referencia para canales abiertos, modelo VOF	69
<b>Figura 47:</b> Red hídrica de las subcuencas trazadas.	72

<b>Figura 48:</b> Caudales promedios mensuales, comparación de datos experimentales e hidrométricos, estaciones: (a) “Puente Los Velázquez” y (b) “Atotonilco II”, río La Gavia. ....	73
<b>Figura 49:</b> Caudales mínimos y medios anuales de la estación “Los Velázquez” .....	74
<b>Figura 50:</b> Comportamiento de caudales promedios anuales, Método racional.....	75
<b>Figura 51:</b> Resultados del método racional para la estimación del caudal, para la sección A. ....	76
<b>Figura 52:</b> Resultados del método racional para la estimación del caudal, para la sección B. ....	76
<b>Figura 53:</b> Comparación de caudales para distintos periodos de retorno, de acuerdo al método SCS, sección A. ....	77
<b>Figura 54:</b> Comparación de caudales para distintos periodos de retorno, de acuerdo al método SCS, sección B. ....	78
<b>Figura 55:</b> Resultados de los aforos en sitio comparados con datos hidrométricos.....	79
<b>Figura 56:</b> Comportamiento de velocidades, en la evaluación espacio temporal .....	81
<b>Figura 57:</b> Comportamiento de áreas húmedas en la evaluación espacio-temporal .....	83
<b>Figura 58:</b> Comportamiento de caudal en la zona [Caudal hidrométrico medio].....	84
<b>Figura 59:</b> Comportamiento de velocidad y zonas de aprovechamiento, de acuerdo a la modelación con caudales medios hidrométricos .....	85
<b>Figura 60:</b> Sección analizada, características geométricas.....	86
<b>Figura 61:</b> Energía específica de acuerdo a los caudales hidrométricos, mínimos, medios y máximos.....	87
<b>Figura 62:</b> Potencia a partir de caudales mínimos, medios y máximos hidrométricos .....	88
<b>Figura 63:</b> Energía específica, Método racional sección A.....	89
<b>Figura 64:</b> Potencia para los caudales modelados, Método racional Sección A.....	89
<b>Figura 65:</b> Energía específica, Método racional sección B .....	90
<b>Figura 66:</b> Potencia para los caudales modelados, Método racional Sección B.....	91
<b>Figura 67:</b> Energía específica, Método HMS-SCS sección A .....	92
<b>Figura 68:</b> Potencia para los caudales modelados, Método HMS-SCS Sección A .....	92
<b>Figura 69:</b> Energía específica, Método HMS-SCS sección B.....	93
<b>Figura 70:</b> Potencia para los caudales modelados, Método HMS-SCS Sección B .....	93
<b>Figura 71:</b> Energía específica, comparación de métodos de estimación de caudal para $Tr=20$ años.....	94
<b>Figura 72:</b> Potencia, Comparación de Métodos de estimación de caudal para $Tr=20$ años .....	95
<b>Figura 73:</b> Vista isométrica de los canales para la sección. ....	96
<b>Figura 74:</b> Energía específica del canal a lo largo del año. ....	98
<b>Figura 75:</b> Proyección de energía específica .....	99
<b>Figura 76:</b> Comportamiento del caudal medio del canal en flujo uniforme, caudal contra tirante. ....	101
<b>Figura 77:</b> Comportamientos de velocidad e flujo en función del tirante, para el canal rectangular propuesto. ....	102
<b>Figura 78:</b> Vista isométrica del dominio de flujo. Diseño final (Canal 3) con canal rectangular de 30m de longitud. ....	103
<b>Figura 79:</b> Vista isométrica del dominio de flujo, canal inicial (canal 1).....	103
<b>Figura 80:</b> Contorno de velocidad total en el canal de longitud 15m. Vista en planta $y=0.55m$ . ....	104
<b>Figura 81:</b> Comportamiento de velocidad en la zona de transición de entrada de flujo.....	105
<b>Figura 82:</b> Vista isométrica del comportamiento de flujo en el canal: $L_{canal}=30 m$ y $L_{muro}=30 m$ . ....	106
<b>Figura 83:</b> Acercamiento a la zona de transición canal dos.....	107
<b>Figura 84:</b> Comportamiento del flujo a la salida del canal dos .....	108
<b>Figura 85:</b> Comportamiento de flujo y velocidad, canal tres.....	109
<b>Figura 86:</b> Análisis de comportamiento de velocidad de flujo en la compuerta.....	109
<b>Figura 87:</b> Vista lateral de comportamiento de flujo en el canal de generación.....	110
<b>Figura 88:</b> Análisis de turbulencia de flujo, en la zona de división de canal. ....	110
<b>Figura 89:</b> Análisis de comportamiento de velocidad de flujo en el canal tres condiciones $Tr = 20$ . ....	111
<b>Figura 90:</b> Comportamiento del flujo en la zona de entrada al canal, $Tr = 20$ años. ....	112
<b>Figura 91:</b> Vista isométrica de comportamiento de turbulencia, $Tr = 20$ .años .....	113
<b>Figura 92:</b> Acercamiento a la zona de turbulencia escenario $Tr = 20$ .....	113
<b>Figura 93:</b> Turbina Smart free stream (80). ....	115
<b>Figura 94:</b> Generalidades de la turbina Indénergie (81) .....	116
<b>Figura 95:</b> Aumento de hombros en la sección .....	121

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Regiones hidrológicas en México, (4). .....	3
<b>Tabla 2:</b> Cuencas y Subcuencas de la RH 26 “Pánuco”, (4). .....	7
<b>Tabla 3:</b> Cuencas y Subcuencas del Estado de México, (5). .....	10
<b>Tabla 4:</b> Formulas deducidas para vertederos, (25). .....	17
<b>Tabla 5:</b> Número de centrales hidráulicas en México, (50). .....	33
<b>Tabla 6:</b> Funciones de distribución de probabilidad utilizadas en eventos de precipitación (68). .....	47
<b>Tabla 7:</b> Datos de tipo de suelo y coeficientes de escurrimiento .....	51
<b>Tabla 8:</b> Caudal ecológico aprovechable para generación hidroeléctrica .....	62
<b>Tabla 9:</b> Régimen de caudales ordinarios acorde al RHN y RHAc. ....	63
<b>Tabla 10:</b> Flujo másico y tirante para modelación .....	69
<b>Tabla 11:</b> Propiedades morfométricas de las subcuencas .....	72
<b>Tabla 12:</b> Intervalos de caudales mensuales, registros de la estación “Los Velazquez” .....	73
<b>Tabla 13:</b> Resultados de aforos mensuales. ....	79
<b>Tabla 14:</b> Resultados del escenario de modelación a partir de caudales mínimos de la estación hidrométrica .....	87
<b>Tabla 15:</b> Energía mínima, tirantes alternos y tirante critico a lo largo del año. ....	97
<b>Tabla 16:</b> Turbinas hidrocínéticas comerciales de baja potencia .....	114
<b>Tabla 17:</b> Descripción de las actividades a realizar durante la construcción del aprovechamiento hidráulico. ....	118
<b>Tabla 18:</b> Descripción de los materiales de construcción. ....	121
<b>Tabla 19:</b> Materias primas e insumos del proyecto. ....	124
<b>Tabla 20:</b> Generación de residuos en las fases de obra, impactos y mitigación. ....	126

## LISTA DE ACRÓNIMOS

1	<b>BANDAS</b>	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales
2	<b>CAD</b>	Computer-Aided Design
3	<b>CARL</b>	Curso Alto del Rio Lerma
4	<b>CFD</b>	Computacional Fluid Dynamics
5	<b>COESPO</b>	Consejo Estatal de Población
6	<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del agua
7	<b>CONAPO</b>	Consejo Nacional de Población
8	<b>CWMS</b>	Corps Water Management System
9	<b>EIA</b>	Evaluación de Impacto Ambiental
10	<b>IDF</b>	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia
11	<b>IMTA</b>	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
12	<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
13	<b>LAN</b>	Ley de Aguas Nacionales
14	<b>LGEEPA</b>	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
15	<b>LIDAR</b>	Light Detection and Ranging
16	<b>MDE</b>	Modelos digitales de Elevación
17	<b>PNH</b>	Plan Nacional Hídrico
18	<b>RANS</b>	Reynolds Averaged Navier-Stokes
19	<b>RH</b>	Regiones Hidrológicas
20	<b>RHA</b>	Región Hidrológico Administrativa
21	<b>RHN</b>	Régimen Hidrológico Natural
22	<b>RNAc</b>	Régimen Hidrológico Actual
23	<b>SEDATU</b>	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
24	<b>SEGOB</b>	Secretaría de Gobernación
25	<b>SEMARNAT</b>	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
26	<b>SIATL</b>	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas
27	<b>SIG</b>	Sistemas de información geográfica
28	<b>SMA</b>	Secretaría del Medio Ambiente Estado de México
29	<b>SMN</b>	Sistema Meteorológico Nacional
30	<b>TIN</b>	Triangulated Irregular Network
31	<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator

# LISTA DE SÍMBOLOS Y UNIDADES

## Adimensionales

$c$	Error cuadrático medio
$n$	Tamaño de la muestra
$\alpha$	Media de logaritmos de la variable aleatoria
$\beta$	Desviación estándar de logaritmos de la variable aleatoria
$f$	Coefficiente de relación lluvia frecuencia
$a, b, c$	Parámetros de tormenta
$R$	Factor de conectividad
$C_e$	Coefficiente de escurrimiento
$S_p$	Retención potencial
$CN$	Numero de curva
$n$	coeficiente de Manning

## Dimensionales

$\mu$	Media de datos de precipitación	[mm]
$\sigma$	Desviación estándar	[mm/h]
$x_0$	Valor estimado	[mm/h]
$x_e$	Variable aleatoria	[mm]
$p_t$	Precipitación en tiempo específico	[mm]
$T_r$	Periodo de retorno	[Años]
$t$	Tiempo de duración	[min]
$P$	Altura de lluvia	[mm]
$Q$	Caudal pico	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_p$	Caudal pico	[m <sup>3</sup> /s]
$I$	Intensidad de lluvia	[mm]
$A_c$	Área de la cuenca	[m <sup>2</sup> ]
$T$	Tiempo de concentración	[min]
$L$	Longitud máxima de salida	[m]
$S$	Pendiente media del lecho	[m/m]
$g$	Aceleración de la gravedad (-9.81)	[m <sup>2</sup> /s]
$A$	Área húmeda	[m <sup>2</sup> ]
$y$	Tirante	[m]
$E_s$	Energía específica	[m]
$\rho$	Densidad de agua (999.1)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$y_c$	Tirante critico	[m]

$R_h$	Radio hidráulico	$[m^2]$
$\dot{m}$	Flujo másico	$[kg/s]$
CMM	Caudal Medio Mensual	$[m^3/s]$
EMA	Escorrentía Medio Anual	$[m^3/s]$
Lag	Tiempo de retraso	$[h]$
W	Potencia	$[kW]$
$\dot{m}_{pq}$	Transferencia de masa de la fase p a q	$[kg/s]$

# Capítulo 1

## 1.Marco teórico

En este apartado se presentan las bases generales de acción del proyecto, describiéndose un marco teórico para delimitación del área de estudio y la aplicación de métodos, que permitieron el procesamiento de datos que se utilizaron en el cálculo de caudales del río “La Gavia” ubicado en Almoloya de Juárez, Estado de México, modelación numérica de flujos, pequeños y micro aprovechamientos hidráulicos, así como el caso México en aprovechamiento del recurso hidráulico para generación hidroeléctrica a pequeña escala.

En la primera sección se describe el área de estudio, que se expone de lo general a lo particular. Se enuncian las Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) así como las Regiones Hidrológicas (RH) en México, para posteriormente establecer la delimitación de la cuenca de estudio y sus propiedades de acuerdo al organismo regulador nacional que es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Cabe destacar que la CONAGUA es el órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), con funciones de derecho público en materia de gestión de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, con autonomía técnica, ejecutiva, administrativa, presupuestal y de gestión, para la consecución de su objetivo. Es el organismo gubernamental responsable de la administración y preservación de las aguas del país con el fin de garantizar el uso sustentable del recurso, así como la responsable de observar el cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa, donde incluye tres áreas operativas: gestión de agua, organismos de cuenca y asistencia técnica. (1)

### ***1.1 HIDROGRAFÍA EN MÉXICO***

En el ciclo hidrológico, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por los ríos y arroyos delimitados por las cuencas hidrográficas, o bien se infiltra en los acuíferos (2). Para el caso de México, la precipitación pluvial es escasa en el norte, en el noroeste del país y en la península de Baja California, mientras que es abundante en el sureste y en las vertientes del Golfo de México y del Pacífico. La precipitación media anual para nuestro país es de 760 mm, equivalente a  $1489 \text{ km}^3$  por año:  $331 \text{ km}^3$  escurren a través de los ríos,  $1\,065 \text{ km}^3$  corresponden a la evapotranspiración y  $93 \text{ km}^3$  recargan los acuíferos. En la mayor parte del territorio la precipitación ocurre, predominantemente, entre junio y septiembre, con excepción de la península de Baja California, donde se presenta en invierno (3).



### 1.1.1 Regiones hidrológico-administrativas (RHA)

La CONAGUA desempeña sus funciones a través de trece organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las regiones hidrológico-administrativas (RHA). El país está dividido en trece regiones hidrológico-administrativas formadas por agrupaciones de cuencas. Los límites de las regiones respetan la división política municipal (4). Como se puede observar en la **Figura 1**, se muestran los nombres y límites de las RH hasta el 2016, así como su respectiva clave numérica establecida por CONAGUA y ratificada por el DOF.



**Figura 1:** Mapa de las regiones hidrológicos-administrativas México, (4).

- Regiones hidrológicas (RH)

Área delimitada por un parteaguas que al menos abarca dos cuencas hidrológicas, cuyas aguas fluyen a una corriente principal (5). Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 RH. A su vez, las regiones hidrológicas se agrupan en 13 RHA. Las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México y se emplean para el cálculo del agua renovable (4).

En la **Tabla 1**, se muestran las claves numéricas de las RH en México, mientras que en la **Figura 2** se encuentra la ubicación y delimitación geográfica de dichas regiones.

**Tabla 1:** Regiones hidrológicas en México, (4).

Clave	RH	Clave	RH	Clave	RH	Clave	RH	Clave	RH
1	B.C. Noreste	9	Sonora Sur	17	Costa Michoacán	25	San Fernando- Soto la Marina	33	Yucatán Este
2	B.C. Centro Oeste	10	Sinaloa	18	Balsas	26	Pánuco	34	Cuencas Cerradas del Norte
3	B.C. Suroeste	11	Presidio-San Pedro	19	Costa Grande de Guerrero	27	Norte de Veracruz (Tuxpan-Nautla)	35	Mapimí
4	B.C. Noreste	12	Lerma-Santiago	20	Costa Chica de Guerrero	28	Papaloapan	36	Naza-Aguanaval
5	B.C. Centro-Este	13	Rio Huicicila	21	Costa de Oaxaca	29	Coatzacoalcos	37	El salado
6	B.C. Sureste	14	Rio Ameca	22	Tehuantepec	30	Grijalva-Usumancita		
7	Rio Colorado	15	Costa de Jalisco	23	Costa de Chiapas	31	Yucatán Oeste		
8	Sonora Norte	16	Armeria Coahuayana	24	Bravo-Conchos	32	Yucatán Norte		

**Figura 2:** Mapa de las regiones hidrológicas en México, (2).

- Cuencas y acuíferos del país

CONAGUA al 31 de diciembre de 2015, tenía publicadas 731 cuencas hidrológicas, conforme a la norma NOM-011-CONAGUA-2000, de las cuales 627 se encontraban en situación de disponibilidad. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 RH, y a su vez se agrupan en las 13 RHA. En lo que se refiere a las aguas subterráneas (2), para fines de la administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos (4).

### 1.1.2 Regiones hidrológicas del Estado de México

El estado de México tiene una extensión total de 22,351 km<sup>2</sup>, se encuentra dividido en 125 municipios, con una precipitación promedio anual de 900 mm, según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que comprenden del año 1981 al año 2010 (2). Las aguas superficiales del Estado de México se encuentran distribuidas en tres regiones hidrológicas, cuya relevancia para este trabajo se orienta en la RH número 12. Estas RH se comparten con otros estados de la república mexicana, como Michoacán y Jalisco. Las RH que abarcan al Estado de México son enunciadas a continuación:

- Región hidrológica 12: “Lerma-Santiago”

En la **Figura 3** se observa la cobertura de la cuenca incluye parcialidades de los estados de México (10%), Querétaro (5%), Guanajuato (40%), Michoacán (28%) y Jalisco (13%); concentra parte importante de la actividad económica del país. Además, el 12.5% de hectáreas para riego a nivel nacional se encuentra dentro de esta cuenca, representando a su vez la producción del 35% del PIB (6). Se divide en tres subcuencas:

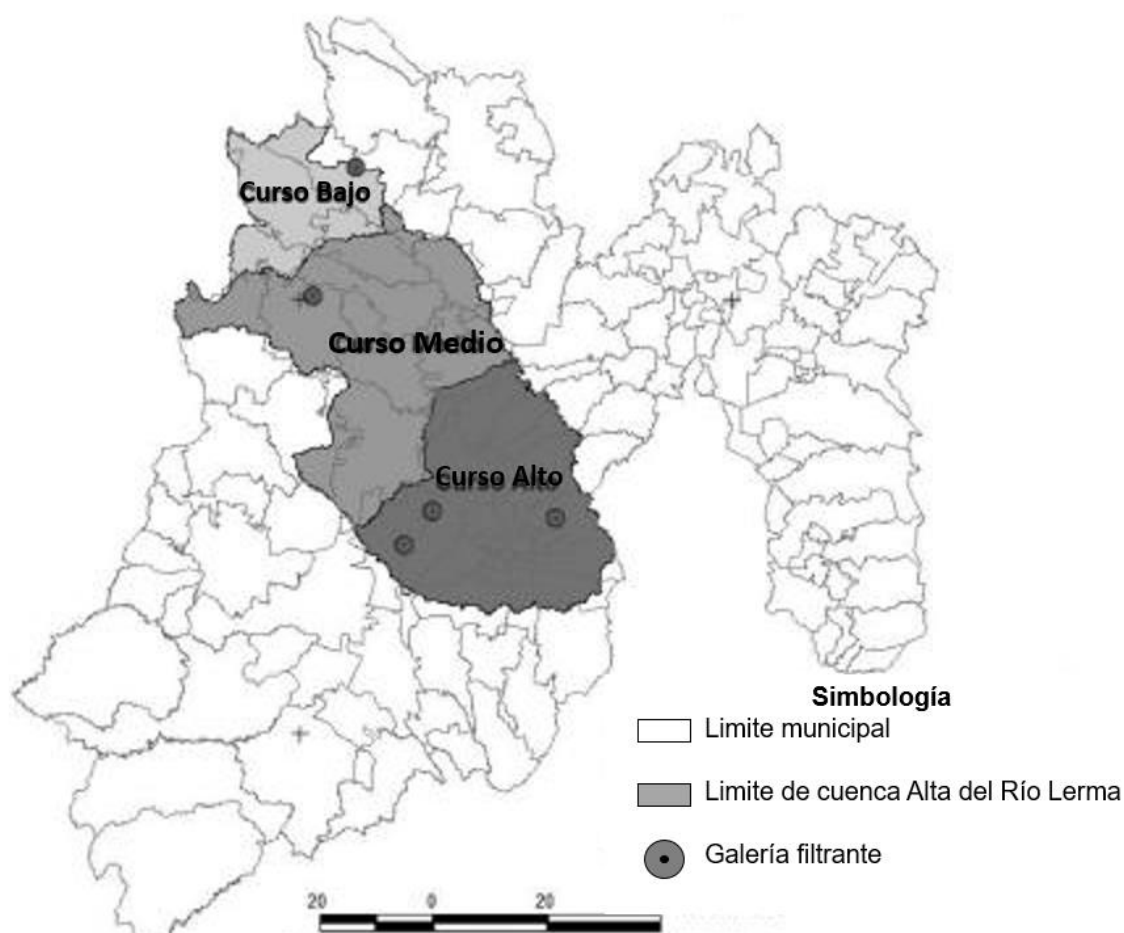
- Curso Alto del río Lerma, se considera desde su más elevada cota, en el Volcan Xinantécatl (Nevado de Toluca), hasta la entrada a la presa J. A. Alzate en los municipios de Toluca y Temoaya (7). Está conformada por 10 subcuencas tributarias (8).
- Curso Medio del río Lerma, se considera desde el embalse Alzate hasta los límites de los municipios de San Felipe del Progreso, Jocotitlán y Atlacomulco (7). Está conformada por 7 subcuencas tributarias (8).
- Curso bajo del río Lerma, comprende los municipios de El Oro, Temascalcingo y Acambay (7). Está conformada por 5 subcuencas tributarias (8).

En el Diario Oficial de la Federación (DOF), en su edición del 27 de mayo de 2016 se publicaron los nombres de las 19 cuencas hidrológicas pertenecientes a esta RH, cuyos nombres son los siguientes: Río Lerma 1, Río La Gavia, Río Jaltepec, Río Lerma 2, Río Lerma 3, Río Lerma 4, Río La Laja 1, Río Querétaro, Río La Laja 2, Laguna de Yuriria, Río Turbio, Río Angulo, Río Lerma 5, Río Lerma 6, Río Zula, Río Duero, Río Lerma 7, Lago Pátzcuaro y Lago Cuitzeo (9).

Hasta 1951, en la región se alimentaba un sistema lagunar de distintos manantiales a pie de monte, entre ellos los de Almoloya, Texcaltengo y Alta Empresa, que se desplazaban 30 km de longitud y se conectaban entre sí por cortos canales que unían a las lagunas de Chignahuapan, en Almoloya del Río, Chimaliapan, en Lerma, y Chiconahuapan en Oztolotepec. De las tres lagunas que surgía el Lerma, hoy solamente la de Almoloya de Río funciona como almacenamiento natural. Las otras dos han sido impactadas de manera más agresiva, por lo que en su espacio original se aprecian llanuras de inundación y Ciénegas (10).

La presa con mayor capacidad, aunque azolvada en más del 80%, es el José Antonio Alzate, alimentado y drenado directamente por las aguas del río Lerma. Está localizada en el límite entre los Cursos Alto y Medio de la cuenca. Le sigue la presa Ignacio Ramírez, también con un alto porcentaje de azolve, y cuyos excedentes son drenados por el río La Gavia. Por último están las presas Trinidad y Tepetitlán; la primera es drenada por el río Zacualpan y la segunda por el río Jaltepec (10).

El río más representativo de esta cuenca es el río Lerma, nace en la laguna de Almoloya del Río y tiene una extensión total de 708 km de los cuales 125 km de recorrido están dentro del estado de México. En la entidad recibe las aguas de los ríos: Almoloya, Oztolotepec, Atlacomulco, Tlalpujahua, Jaltepec, Gavia, Tejalpa, Verdiguél, Oztolotepec y Sila (11).



**Figura 3:** Mapa de las Subcuenca Alta del Río Lerma, (7).

- Región hidrológica 18: “Balsas”

La **Figura 4**, se observan las subregiones y cuencas hidrológicas de la Región Hidrológica. Esta localiza al Suroeste del país, está limitada al Norte por: RH12 Lerma-Santiago, RH26 Río Pánuco y RH 27 Norte de Veracruz; al Oeste por: RH16 Armería Coahuayana y RH17 Costa de Michoacán; al Sur por el Océano Pacífico y por: RH19 Costa Grande de Guerrero y RH20 Costa Chica de Guerrero; y al Este por la RH28 Papaloapan (12).

Incluye en su totalidad al Estado de Morelos (100%) y parcialmente a los Estados de Tlaxcala (75%), Puebla (55%), Estado de México (36%), Oaxaca (9%), Guerrero (63%), Michoacán (62%) y Jalisco (4%), así como muy pequeñas porciones de Ciudad de México y del Estado de Veracruz; con un total de 422 municipios y una superficie total de 117,305.9 km<sup>2</sup> (12).

La RH 18 se encuentra constituida por quince cuencas. Río Alto Atoyac, Río Amacuzac, Río Tlapaneco, Río Nexapa, Río Mixteco, Río Bajo Atoyac, Río Cutzamala, Río Medio Balsas, Río Cupatitzio, Río Tacámbaro, Río Tepalcatepec, Río Bajo Balsas, Río Paracho-Nahuatzen, Río Zirahuén y Río Libres Oriental. Para el caso Estado de México las de importancia más relevante son: Río Cutzamala, Río Grande de Amacuzac, Río Bajo Balsas y el Río Bajo Atoyac (9).

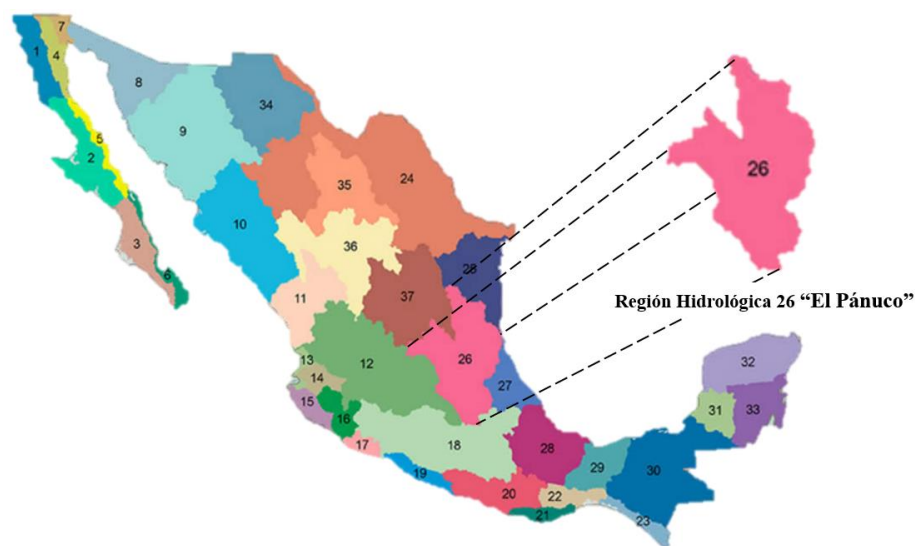


**Figura 4:** Mapa de las Subregiones y cuencas hidrológicas de la Región Hidrológica número 18 Balsas, (12).

- Región hidrológica 26: “Pánuco”

La ubicación de la región hidrológica 26 se observa en la **Figura 5**, estatiene una superficie de 97,196 km<sup>2</sup> desde su nacimiento en el Valle de México hasta la desembocadura del cauce principal en el Golfo de México. La región hidrológica comprende principalmente parte de la Ciudad de México y los estados de Guanajuato, Hidalgo, Estado de México, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz, así como pequeñas porciones de los estados de Nuevo León, Puebla y Tlaxcala. Para fines de gestión del recurso hídrico superficial, la RH 26 Pánuco se ha dividido en 77 cuencas hidrológicas (13).

La RH26, está conformada por cuatro cuencas y 46 subcuencas (14), enunciadas en la Tabla 2.



**Figura 5:** Mapa de ubicación geográfica de la Región Hidrológica “Pánuco”, (4).



**Tabla 2:** Cuencas y Subcuencas de la RH 26 “Pánuco”, (4).

RH 26 "Pánuco"						
Cuenca	R. MOCTEZUMA			R. PÁNUCO	R. TAMESÍ	R. TAMUÍN
Subcuencas	R. Cuautitlán	R. Arroyo Zarco	R. Extoraz	R. Chicayan	R. Tamesí	R. Santa María Bajo
	L. Texcoco y Zumpango	R. Tecozutla	R. Calabozo	L. Pueblo Viejo	R. Comandante	R. Santa María Alto
	Tepotzotlán	R. Alfajayucan	R. San Pedro	R. Pánuco	R. Sabinas	R. Valles
	L. Tochac y Tecocomulco	Drenaje Caracol	R. Axtla		R. Guayalejo	R. Tamuín o Tampaón
	R. El Salto	R. Actopan	R. Tempoal			Drenaje Subterráneo 2
	R. Tlautla	R. Tula	R. Moctezuma			R. Gallinas
	R. Rosas	R. Metztlán				R. Puerco
	R. Tezontepec	R. San Juan				R. Mesillas
	R. Salado	R. Amajac				R. Verde
	R. Prieto	R. Los Hules				R. de los Naranjos

### 1.1.3 Cuencas y Subcuencas del Estado de México

A continuación se enuncian las cuencas y subcuencas respectivas de cada RH que cubren al Estado de México, de acuerdo con datos de CONAGUA, INEGI y DOF.

El Estado de México se encuentra monitoreado por 3 RHA; VII Lerma-Santiago-Pacífico, IV Balsas y la XII Aguas del Valle de México. Cubierto por 3 RH, 12 Lerma- Santiago, 18 Balsas, 26 Pánuco, siendo las RH de mayor importancia para este trabajo dado que enuncia dominios hidrológicos establecidos por CONAGUA y ratificados por DOF para la delimitación de la zona de estudio.

Las RH se dividen en cuencas hidrológicas y a su vez en subcuencas, donde de acuerdo con sus características geográficas están delimitadas aun fuera de los límites de los estados, estas no se rigen por límites políticos, ya sea por estado o municipio. El estado comprende 5 cuencas, y 34 subcuencas (**Figura 6**), donde la de mayor importancia es la Lerma-Toluca, o Curso Alto del río Lerma.

- Región hidrológica 12: “Lerma-Santiago”

De acuerdo con el Anuario estadístico y geográfico de México 2016, la cuenca que cubre al Estado de México perteneciente a dicha RH es la denominada “Lerma-Toluca” o Curso Alto del río Lerma (CARL), a la cual pertenecen las Subcuencas: R. Almoloya–Otzolotepec, R. Otzolotepec-R. Atlacomulco, R. Atlacomulco-Paso de Ovejas, R. Tlalpujahua, R. Jaltepec, R. La Gavia, R. Tejalpa, R. Verdiguél, R. Otzolotepec, R. Sila, dentro del régimen estatal (5)

Cabe destacar que de acuerdo con el Atlas Urbano de la Cuenca Hidrológica del Río Lerma, publicado por el Gobierno del Estado de México en su versión más reciente del año 2002, que se adjunta en un compendio de Atlas Urbanos del Estado de México en su versión de publicación más reciente en el año

2011, por su gran extensión, la Cuenca fue dividida en 20 subcuencas, tomando en cuenta los principales escurrimientos superficiales y cuerpos de agua (15), enlistadas a continuación:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Laguna de Almoloya del Río                      | 11. Arroyo Sila y San Bartolo           |
| 2. Arroyo Muerto y Xalatlaco                       | 12. Arroyo San Pedro del Rosal          |
| 3. Arroyo Salazar                                  | 13. Arroyo Tierra Blanca                |
| 4. Arroyo Seco y San Mateo                         | 14. Arroyo el Salto                     |
| 5. Corrientes Río San Lorenzo y arroyo el Jilguero | 15. Arroyos la Jordana y Santiago       |
| 6. Corriente Río Zolotepec.                        | 16. Presa Tepeltitlán y Arroyo Jaltepec |
| 7. Corriente Río Mayorazgo                         | 17. Arroyo San Cayetano                 |
| 8. Arroyo Zarco                                    | 18. Arroyo Tejalpa                      |
| 9. Arroyo Temoaya                                  | 19. Corriente Río Verdiguél             |
| 10. Presa José Antonio Alzate                      | 20. Presa Ignacio Ramírez               |

Así pues, para el control de las Cuencas ya descritas se dividieron en 10 consejos intermunicipales formados de la siguiente manera (15):

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Subcuenca de la primera laguna de Lerma       | 6. Subcuenca Curso Bajo      |
| 2. Subcuenca del Río Arenal norte                | 7. Subcuenca Tepetitlán      |
| 3. Subcuenca del Río Sila                        | 8. Subcuenca Ignacio Ramírez |
| 4. Subcuenca de los Ríos Arroyo Zarco y San Juan | 9. Subcuenca Río Ocoyoacac   |
| 5. Subcuenca del Río Acalotli                    | 10. Subcuenca Río Tejalpa    |

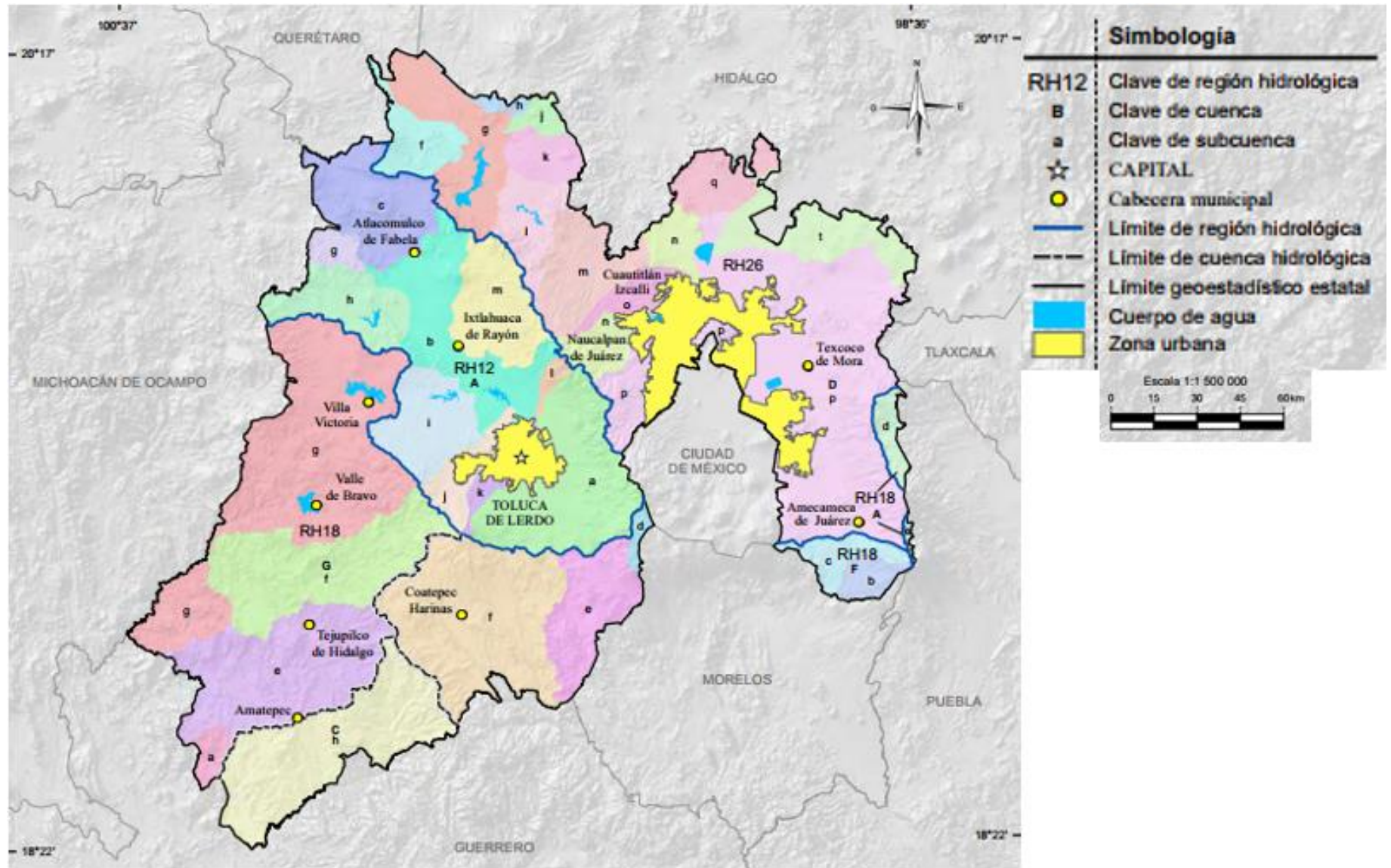
- Región hidrológica 18: “Balsas”

Cubre el 36% de la superficie estatal (12), drenando las aguas del sur y del oeste de la entidad hacia el río Balsas que vierte sus aguas al océano Pacífico. Las cuencas de esta RH y la porción del territorio estatal que cobijan son: Río Cutzamala (22.95%), Río Grande de Amacuzac (12.06%), Río Balsas-Zirándaro (6.07%) y Río Atoyac (0.73%) (8).

Las subcuencas hidrológicas que cobijan al Estado de México dentro de esta RH son: R. Atoyac-San Martín Texmelucan, R. Nexapa y subcuencas de la cuenca Río Atoyac; Subcuenca R. Poliutla, Subcuenca de la Cuenca Río Balsas-Zirándaro; R. Cuautla, R. Yautepec, R. Apatlaco, R. Coatlán, R. Alto Amacuzac; Subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Grande de Amacuzac y las Subcuencas de la cuenca Río Cutzamala, R. Ixtapan, R. Temascaltepec, y R. Tilostoc (5).

- Región hidrológica 26: “Pánuco”

La cuenca de esta RH que cobija al Estado de México es la R. Moctezuma, donde las subcuencas que tocan la superficie estatal son: R. Prieto, R. Arroyo Zarco, R. Tecozutla, R. Tula, R. Rosas, R. Tlautla, R. El Salto, R. Cuautitlán, R. Tepotzotlán, L. Texcoco y Zumpango, R. Salado, R. Tezontepec (5).



*Figura 6: Hidrografía del Estado de México, Cuencas y Subcuencas, (5)*



**Tabla 3:** Cuencas y Subcuencas del Estado de México, (5).

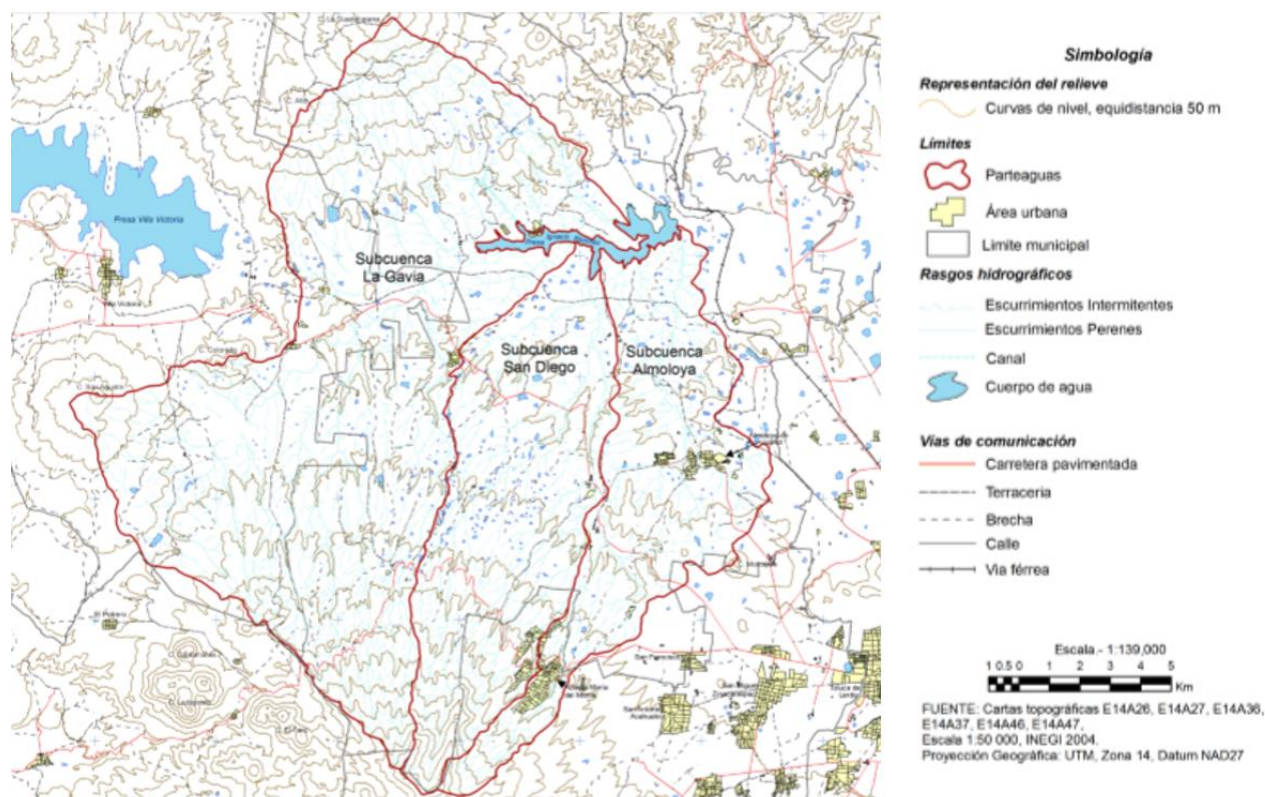
Región		Cuenca		Subcuenca	
Clave	Nombre	Clave	Nombre	Clave	Nombre
<b>RH12</b>	<b>Lerma-Santiago</b>	<b>A</b>	<b>R. Lerma-Toluca</b>	<b>a</b>	R.Almoloya - Otzolotepec
				<b>b</b>	R.Otzolotepec - R. Atlacomulco
				<b>c</b>	R.Atlacomulco - Paso de Ovejas
				<b>g</b>	R.Tlalpujahua
				<b>h</b>	R.Jaltepec
				<b>i</b>	R.Gavia
				<b>j</b>	R.Tejalpa
				<b>k</b>	R.Verdiguel
				<b>l</b>	R.Otzolotepec
				<b>m</b>	R.Sila
<b>RH18</b>	<b>Balsas</b>	<b>A</b>	<b>R. Atoyac</b>	<b>d</b>	<b>R.Atoyac - San Martín Texmelucan</b>
		<b>C</b>	<b>R. Balsas-Zirándaro</b>	<b>e</b>	R.Nexapa
				<b>h</b>	R.Poliutla
				<b>b</b>	R. Cuautla
		<b>F</b>	<b>R. Grande de Amacuza</b>	<b>c</b>	R.Yautepec
				<b>d</b>	R.Apatlaco
				<b>e</b>	R.Coatlán
				<b>f</b>	R.Alto Amacuza
		<b>G</b>	<b>R. Cutzamala</b>	<b>a</b>	R. Cutzamala
				<b>e</b>	R. Ixtapan
				<b>f</b>	R. Temascaltepec
				<b>g</b>	R. Tilostoc
<b>RH26</b>	<b>Pánuco</b>	<b>D</b>	<b>R. Moctezuma</b>	<b>f</b>	R. Prieto
				<b>g</b>	R. Arroyo Zarco
				<b>h</b>	R. Tecozutla
				<b>j</b>	R. Tula
				<b>k</b>	R. Rosas
				<b>l</b>	R. Tlautla
				<b>m</b>	R. El Salto
				<b>n</b>	R. Cuautitlán
				<b>o</b>	Tepotzotlán
				<b>p</b>	L. Texcoco y Zumpango
				<b>q</b>	R. Salado
				<b>t</b>	R. Tezontepec

## 1.2 SUBCUENCA LA GAVIA

En la **Figura 7** se observa la ubicación geográfica referencia de la subcuenca la gavia, la cual es Comprendida desde el origen del Río la Gavia hasta donde se localiza la presa Ignacio Ramírez, la cual tiene una extensión de 6.46 km<sup>2</sup> (16), y de acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal de Almoloya de Juárez 2012, una capacidad de 36.30 millones de m<sup>3</sup> (17). Pertenecer a la región hidrológica número 12, Lerma – Santiago, a su vez a la cuenca Lerma-Toluca, y a la subcuenca La Gavia, donde proporciona el 86.04% de total de suministro de agua en Almoloya de Juárez. La principal corriente de agua que alimenta al municipio, es el río La Gavia clasificándose como corriente de aguas perennes (18).

La cuenca tiene una superficie de aportación de 505 km<sup>2</sup>, y geográficamente se ubica en el centro del país, dentro del cuadro de coordenadas 19°15' y 19°35' latitud Norte y 99°40' y 100°00' longitud Oeste. Se encuentra delimitada por las regiones y cuencas hidrológicas: al Norte por la cuenca Río Lerma 2, al Sur y al Este por la cuenca Río Lerma 1 y al Oeste por la RH número 18 Balsas (16). Actualmente esta cuenca, de acuerdo al Atlas de Agua en México, se encuentra en déficit con disponibilidad negativa. (4).

Los arroyos principales de la Subcuenca son: San Diego, San Cristóbal, San Javier, La Monera, Nigue, San José, Tejocotes, Las Cebollas, El Salitre, San Pedro, La Guajolota, Los Ciervos, La Venta, El Tulillo, La Pila, El Rosario, Agua Chiquita, Los Capullos, Chiquito, Dolores, Turcio (10).



**Figura 7:** Mapa de ubicación de la cuenca La Gavia, (17).

### *1.2.1 Río La Gavia*

El Río la Gavia nace en la parte Oeste de la subcuenca La Gavia y se desarrolla en dirección Noreste hasta descargar sus aguas en el vaso de la presa Ignacio Ramírez, junto con otros dos ríos denominados El Rosario y Almoloya de Juárez (16).

Para esta presa las corrientes más importantes que confluyen son el arroyo La Gavia, al que en su inicio se llama arroyo Turcio; desciende desde los 2,800 msnm; ocho km adelante desemboca en la Presa Dolores, al oriente de San Agustín Altamirano. Aguas debajo de la presa se le llama arroyo Dolores; a la altura de San Joaquín del Monte su caudal se incrementa al recibir un afluente formado por los arroyos Chiquito, Los Capullos y La Gavia; a partir de aquí se le conoce como arroyo La Gavia; luego de dos km recibe al arroyo Agua Chiquita, y después de otros dos al arroyo El Rosario, a tres km de Cieneguillas; recibe luego al arroyo Solanos, formado por los arroyos San Juan, La Morera, San Javier y San José; un km adelante descarga en la presa Ignacio Ramírez (10).

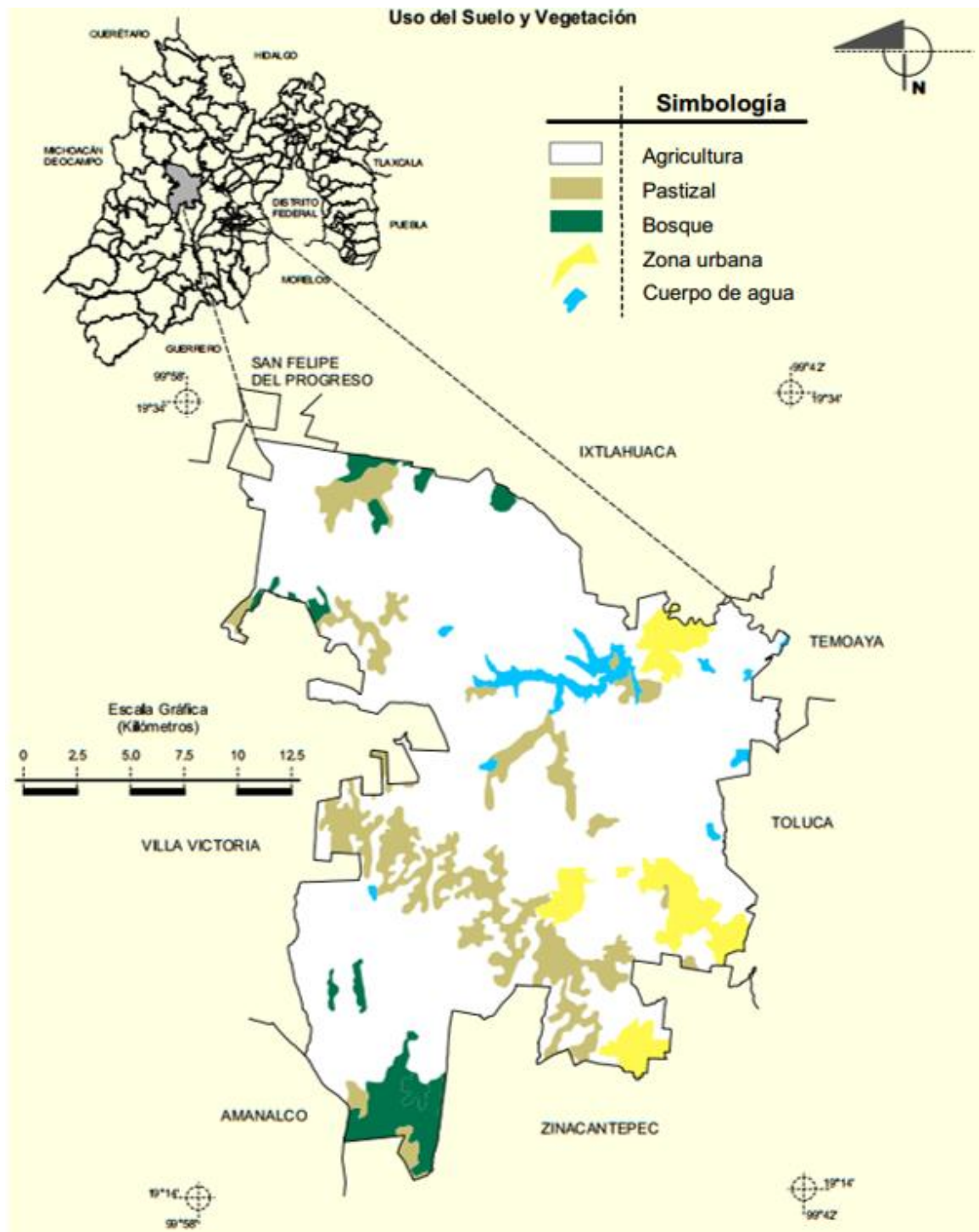
De acuerdo al Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Almoloya de Juárez, en su versión más reciente del año 2009, enuncia que La Gavia es una corriente de agua de tipo perenne, esto quiere decir que siempre existe escurrimiento en esta (18).

Los escurrimientos de los ríos La Gavia, El Rosario y Almoloya, captados en la presa Ignacio Ramírez llegan adelante de la presa José Antonio Alzate. Se cuantifican en la estación Atotonilco II, que ha medido un escurrimiento medio anual de 77.3 millones de m<sup>3</sup> y un caudal medio de 2.5 m<sup>3</sup>/s (10).

### *1.2.2 Descripción del río la Gavia y aplicación a la zona de estudio*

En este apartado se realiza una descripción general de uso de suelo, población, entre otros aspectos, de acuerdo a la comunidad de Benito Juárez, en Almoloya de Juárez la cual se delimita como el área de estudio para el aprovechamiento hidráulico, es decir sobre la línea recta del río La Gavia hasta la desembocadura en la presa Ignacio Ramírez (2.22km).

El clima predominante de la región es templado, subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco, menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T (índice de humedad de Lang) mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (6).



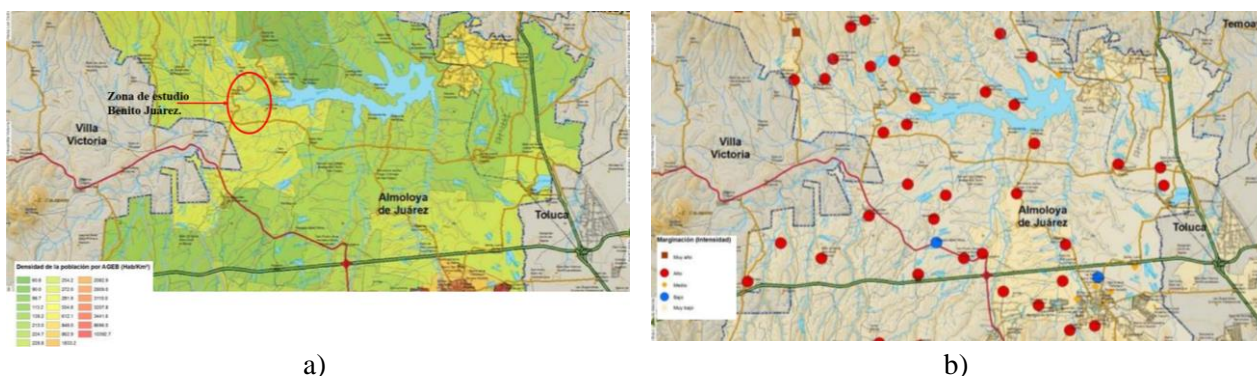
**Figura 8:** Mapa de uso de suelo y vegetación Almoloya de Juárez, (18).

Dentro de la geomorfología del municipio de Almoloya de Juárez, se encuentran: sierras, lomeríos y una pequeña llanura. La zona de estudio está conformada principalmente por lomeríos, así como una pequeña parte de ciénegas para pastoreo (6). La zona se encuentra ocupada la actividad agrícola de temporal de baja intensidad, es decir para autoconsumo en su mayoría, Los cuerpos de agua se destinan principalmente al desarrollo de dicha actividad (19), (**Figura 8**)



De acuerdo con la Figura 9 a) (AGEB, 2010) del Atlas de Riesgo de Almoloya de Juárez 2016, la densidad de población radica en 254.2 a 272.0 Hab/km<sup>2</sup>. El índice de marginación de la zona es alto, lo que se muestra de manera gráfica en la Figura 9 b) del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010), del Atlas de Riesgo de Almoloya de Juárez (2016) (6).

La clasificación del CONAPO, como escala de evaluación es la siguiente: Muy bajo [ -1.50487 , -0.98855 ], Bajo [ -0.98855 , -0.21407 ], Medio [-0.21407 , 0.30225 ], Alto [0.30225 , 1.07674 ], y Muy alto [1.07674 , 2.41213 ]. Tales intervalos se obtienen a partir de los indicadores socioeconómicos definidos por el CONAPO, con base en el II Censo de Población y Vivienda 2005 y Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo 2005 (IV Trimestre) (20). La comunidad aledaña a donde se desarrolla el presente estudio, es de tipo rural (Documento de catálogo de localidades) (21).



**Figura 9:** Mapas de densidad de población y grado de marginación, (6).

Una de las poblaciones cercanas al río La Gavia, y la cual es el área para la aplicación del aprovechamiento hidráulico es la comunidad Benito Juárez, municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México y se localiza en las coordenadas -99.863056° de longitud oeste y 19.448889° de latitud norte. La localidad se encuentra a una altitud de 2570 metros sobre el nivel del mar.

Con base en el catálogo de Localidades, en la comunidad de Benito Juárez hay 591 viviendas, de ellas el 96,72% cuentan con electricidad, el 50,97% tienen agua entubada, el 74,32% tiene excusado o sanitario, el 76,83% radio, el 91,51% televisión, el 43,05% refrigerador, el 8,30% lavadora, el 21,04% automóvil, el 2,12% una computadora personal, el 10,04% teléfono fijo, el 48,07% teléfono celular, y el 0,19% Internet.

Hasta diciembre del 2010, el 3.1% de la población de la comunidad no contaba con energía eléctrica en su hogar (21).

### 1.3 MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES

Las mediciones de flujo en canales abiertos, es recomendable realizarlas rutinariamente ya que proporcionan información sobre el flujo en el momento de la medición, y para el desarrollo de clasificaciones de descarga usadas para derivar datos de flujo continuo desde estaciones de nivel de agua, esto es un componente clave para planificar, mantener y registrar los tipos de flujo en canales abiertos y de esta manera atender a los componentes climatológicos que pudieran afectar.

Muchos ríos son medidos para una amplia variedad de propósitos, incluidos el control de avenidas, disponibilidad, almacenamiento, distribución, etc. La mayoría de las mediciones de flujo de canal abierto

se realizan en una estación de nivel de agua para permitir la derivación del flujo continuo desde el registro de dicho nivel.

El método más utilizado para medir el flujo ha sido el método de área de velocidad que usa dispositivos acústicos y/o mecánicos, los cuales son medidores de corriente con elementos rotativos. La tecnología acústica surgió en la década de 1990 implementada como dispositivos de medición de corriente que usan el método de área de velocidad. La tecnología acústica de los años 2010, ha sido adoptada por la mayoría de las agencias de recopilación de datos (22). Las brigadas de hidrometría realizan aforos, usando los métodos del molinete, secciones calibradas y estructuras, tales como compuertas radiales y rectangulares (23).

### *1.3.1 Estimación de caudales con datos experimentales (in-situ)*

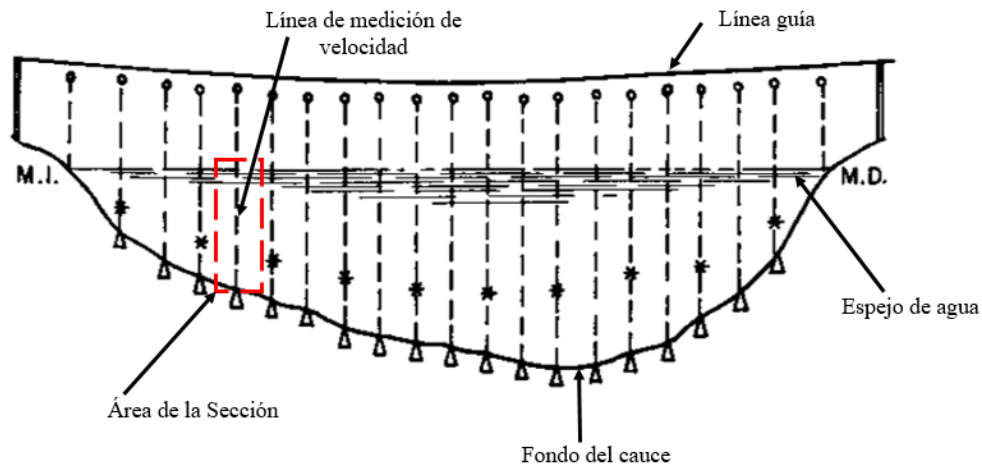
La selección del método del volumen a medir, dependerá de las condiciones bajo la cuales deben efectuarse las medidas de la exactitud requerida, mientras que el equipo y los elementos que se dispongan a aforar juega un rol importante. Existen distintos métodos: aforo volumétrico, utilizando estructuras aforadoras, por área-velocidad, de manera química y utilizando ecuaciones empíricas, entre otras (24). A continuación se describen brevemente algunos de los métodos utilizados para la medición de caudales con medición de datos en sitio.

- **Área-Velocidad**

El método de área y velocidad; consiste en determinar el área de una sección transversal de la corriente y la velocidad del agua a través de esta, la cual depende de las características de la sección transversal, rozamiento, viscosidad, tensión superficial y alineación de la corriente (23).

La sección transversal de área de una corriente, está limitada en la parte superior por la superficie del agua, por las paredes que forman los lados y por el fondo. Puede determinarse usando sondas, lo cual consiste en dejar que el escandallo llegue al fondo del cauce. Si el aforador está cerca de la superficie del agua, marcará la sondaleza tomándola con los dedos; de otra manera, deberá tomar la cuerda referida a un punto fijo, irá midiendo la longitud de cuerda que se va sacado hasta el escandallo sobre la superficie del agua. En las secciones de aforo seleccionadas, se dividirá la sección transversal de la corriente en áreas pequeñas, es decir en franjas verticales en las cuales se mide la velocidad media ya sea con molinete o con flotadores, para proporcionar el gasto parcial de la sección transversal. El gasto total se estima, sumando los gastos parciales obtenidos en cada franja. La forma más precisa es tomar lecturas a 20% y 80% del tirante a partir de la superficie libre del agua y promediar las velocidades a dichas profundidades.

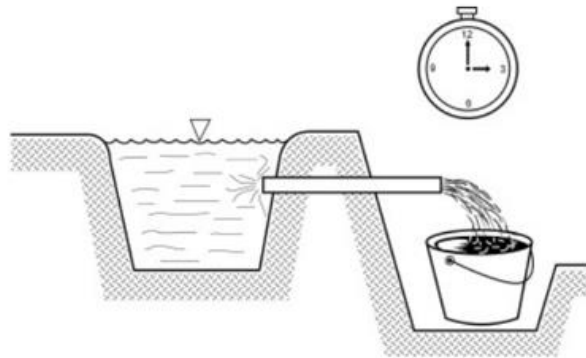
El método más sencillo para determinar la velocidad media, consiste el colocar el molinete a un 60% de la profundidad media a partir de la superficie del agua en cada franja vertical, ya que a esta profundidad la velocidad es muy semejante a la velocidad media. (23). En la **Figura 10** se muestra el esquema general de geometría del método área velocidad.



**Figura 10:** Esquema de división de franjas en un cauce, método área velocidad, (23).

- Aforo volumétrico:

Se emplea por lo general para caudales muy pequeños y se requiere de un recipiente de un volumen conocido para captar el agua. El caudal resulta de dividir el volumen de agua que se recoge en el recipiente entre el tiempo que transcurre en captarlo (**Figura 11**). (25)

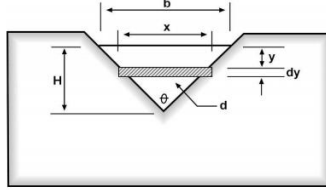
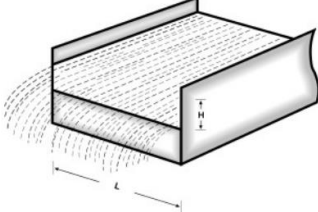
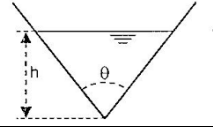
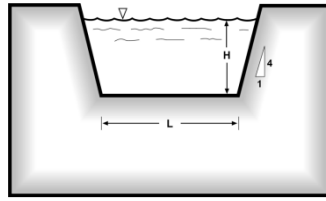
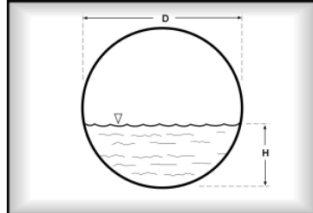


**Figura 11:** Método volumétrico de medición de caudal, (25).

- Estructuras aforadoras (Vertederos)

Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye, se clasifican según el ancho de pared, forma y el ancho del vertedero, obteniéndose sus caudales promedio a partir de las ecuaciones deducidas de manera heurística (25), En la **Tabla 4**, se observan las ecuaciones y características generales para el aforo a partir de vertederos.

**Tabla 4:** Formulas deducidas para vertederos, (25).

Tipo de vertedero	Ecuación deducida para el caudal	Descripción
Triangular de pared delgada Cd=Coeficiente de descarga	$Q_{real} = Cd \frac{8}{15} \sqrt{2g} \frac{\tan \theta}{2} H^{5/2}$	
Vertedero rectangular n=Numero de contracciones	$Q = 1.84 (L - (0.1 n H)) H^{3/2}$	
Rectangular sin contracciones	$Q = 1.84 L H^{3/2}$	
Vertedero Triangular	$Q = 1.4 H^{5/2}$	6.3.- Sección triangular 
Trapezoidal	$Q = 1.859 L H^{3/2}$	
Circular	$Q = 1.518 D^{0.693} H^{1.807}$	

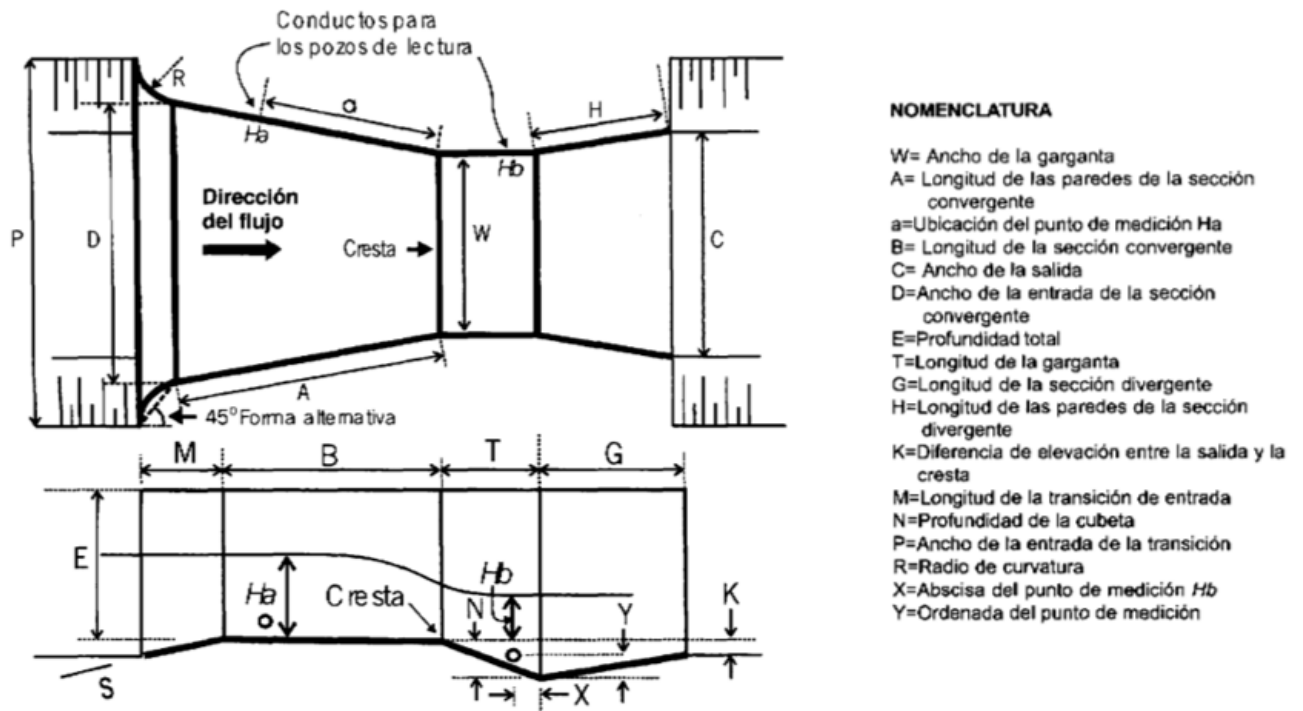
- Canal de Parshall

Son identificados nominalmente por el ancho de su garganta, las partes de este son: transición de entrada, sección convergente, garganta, y sección divergente.

En la transición de entrada es conveniente elevar el piso sobre el fondo original del canal, con una pendiente ascendente de 1:4 (1 vertical y 4 horizontal), hasta comenzar la sección convergente, con paredes que se van cerrando en línea recta o circular de radio (R), debido a que el aforador Parshall es una reducción de la sección del canal, que obliga al agua a elevarse o a remansarse para luego volver a descender hasta el nivel inicial sin el aforador. En este proceso se presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la altura de carga o elevación que alcanza el agua y el caudal que circula a través del dispositivo. En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo. En la garganta el piso vuelve a bajar con una pendiente de 3:8 (3 vertical y 8 horizontal).



En la sección divergente el piso sube nuevamente con pendiente de 1:6 (1 vertical y 6 horizontal) (26). En la **Tabla 14**, se observan y describen las características generales de los aforadores Parshall.



**Figura 12:** Nomenclatura de las partes del aforador Parshall, (26).

Se puede mencionar como una de las principales ventajas la facilidad con la que pueden ser construidos, además presentan otras que tienen sus propias características hidráulicas, por ejemplo: una sola medida o determinación de carga es suficiente para determinar el caudal, la pérdida de carga es mínima, el paso del flujo es libre y por lo tanto no presenta problemas de obstrucción con elementos arrastrados por la corriente, al ser la velocidad de la garganta mayor que la velocidad de aproximación, no existe la posibilidad que ocurran sedimentaciones que afecten las mediciones.

- Método por trazadores.

Las mediciones de descarga con este método se basan en la Ley de Conservación de Masa. Un trazador de concentración conocida se inyecta en una sección de velocidad aproximadamente constante, durante un tiempo determinado aguas arriba del sitio, las concentraciones se miden antes, durante y después de que el rastreador pase el sitio. La concentración se determina por la ecuación (27):

$$Q_s = 5.89 \times 10^{-7} \frac{c_i Q_i}{c_g - c_b}$$

$Q_s$ = Descarga de corriente [ $\text{ft}/\text{m}^3$ ]       $c_i$ = Concentración inyectada [ $\text{mg}/\text{L}$ ]

$Q_i$ = Tasa de inyección del trazador [ $\text{mL}/\text{min}$ ]

$c_g$ = Concentración del trazador en la estación del calibrador [ $\text{mg}/\text{L}$ ]

$c_b$ = Concentración de fondo del trazador [ $\text{mg}/\text{L}$ ]

### 1.3.2 Estimación de datos hidrométricos

Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal se genera por la precipitación pluvial, así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales. También deben considerarse las descargas asociadas a los diversos usos del agua. En ocasiones los cauces están regulados por presas y otras obras de control (28).

El conocimiento de la cantidad y calidad del agua es importante para el abastecimiento de agua potable municipal e industrial, el control de avenidas, el diseño y operación de presas, la generación de energía hidroeléctrica, la irrigación, las actividades recreativas relacionadas con el agua, la navegación fluvial, el cuidado y preservación de flora y fauna, el drenaje, el tratamiento de aguas residuales y la potabilización (29).

La Red Hidrométrica Nacional (RHN) registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana. Algunas estaciones también registran parámetros climatológicos. Al 31 de diciembre de 2015, la RHN contaba con 861 estaciones hidrométricas en operación (28).

La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica es:

- **Valores diarios:** Gasto medio diario ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) día 1 a día 29-31, medido cada 3, 5 o 10 minutos.
- **Valores mensuales:** Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de  $\text{m}^3$ ), sedimentos (miles de  $\text{m}^3$ ) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- **Valores anuales:** Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de  $\text{m}^3$ ), gasto medio anual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y volumen anual de sedimentos (miles de  $\text{m}^3$ ).
- **Hidrograma:** Incluye la fecha en que ocurre el gasto, Hora en que ocurre el gasto y Gasto instantáneo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).
- **Limnigrama:** Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- **Sedimentos:** Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

Con los datos capturados, se puede poner en práctica la metodología establecida en la NOM-011-CONAGUA-2015: Conservación del recurso agua – que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Cuyo objetivo es establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento (30).

### 1.3.3 Estimación de caudales con métodos hidrometeorológicos y matemáticos

Los métodos hidrometeorológicos, son métodos racionales basados en la aplicación de una intensidad media de precipitación obtenida de los mapas pluviométricos en toda la superficie de la cuenca, realizando una estimación de la escorrentía superficial obtienen resultados confiables en cuencas pequeñas, es decir, en aquellas con un tiempo de concentración igual o inferior a seis horas. Mientras que los métodos basados en modelos matemáticos relacionan el caudal máximo con el área de la cuenca, la intensidad de precipitación, el coeficiente de escorrentía, la pendiente media, la existencia de vegetación o la permeabilidad el suelo (31). La mayoría de las relaciones y características de los modelos matemáticos se pueden obtener mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

- Método racional

Modelo hidrometeorológico para la obtención de caudal máximo de la escorrentía de una cuenca, en determinado periodo de retorno mediante los parámetros de intensidad de lluvia, este método toma en cuenta tres hipótesis fundamentales (32):

- La intensidad de precipitación es uniforme y no varía con el tiempo
- El almacenamiento de agua en la cuenca es insignificante
- La duración de la precipitación que produce el caudal máximo es equivalente al tiempo de concentración de la cuenca

Donde el tiempo de concentración se define cómo el tiempo que tarda una gota de lluvia en trasladarse del punto más alto de la cuenca hasta su salida. Con ello se imponen una serie de restricciones para la aplicación del método, la principal de ellas es la superficie de la cuenca, concebida para áreas relativamente pequeñas, estableciendo un intervalo general de entre 0.65 a 13 km<sup>2</sup>

Así se obliga a realizar dos comprobaciones para determinar el caudal máximo de la salida de una cuenca, en la primera se verifica si existe alguna sección del cauce principal aguas arriba del punto de concentración para que el caudal calculado sea mayor que para la cuenca global, esto quiere decir que con el conocimiento del eje drenante principal se determina el tiempo de concentración, tomando como referencia el punto hidráulicamente más alejado, calculando para cada sección del eje, el producto que determina su área tributaria, si la concentración no tiene un incremento más o menos lineal, el caudal máximo de cálculo puede no venir determinado por el punto de concentración global de la cuenca, esto para casos de cuenca con estrechamiento en la parte inferior o complejo uso de suelo. En el segundo caso tiene como fin confirmar la existencia de alguna fracción de la cuenca, que compartiendo el mismo punto de concentración que la cuenca global, determine un caudal calculado mayor (32).

La ecuación del método racional (gasto máximo posible que puede producirse con lluvia de intensidad  $I$  en una cuenca de área  $A_c$  y coeficiente de escurrimiento  $C_e$ , que expresa la fracción de lluvia que escurre en forma directa) (33):

- Método racional modificado

La modificación al método racional consiste en utilizar los valores de lluvia máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno, en lugar del valor de la intensidad de lluvia. El método considera que para un periodo crítico, la lluvia reportada en 24 horas puede presentarse en una hora; por tal razón este valor se debe expresar en cm/h. La ecuación queda de la siguiente manera (33):

$$Q = 0.028C_ePA$$

Donde:

$Q$  = Escurrimiento Máximo [ $m^3/s$ ]

$C_e$  = Coeficiente de escurrimiento

$P$  = Lluvia de diseño asociado a un período de retorno [cm]

$A$  = área de la cuenca [ha]

- Modelo HEC-HMS

Modelo de lluvia y esorrentía, diseñado para simular el hidrograma de esorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un episodio de lluvia, así como la afectación sobre el mismo, por posibles cambios climáticos y cambios de uso del terreno, esto a partir de los datos de los distintos pluviómetros con influencia en una cuenca, de esta manera determina los caudales que circulan por los distintos tramos de río.

Los componentes del modelo funcionan basados en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas, por ejemplo: pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base y circulación por el cauce.

El punto de partida de cada sistema se caracteriza fundamentalmente por dos elementos: una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo, es decir la representación distribuida de la cuenca basada en una red ramificada de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas-embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces). La entrada al modelo es la precipitación evaluada a partir de los registros de precipitación de las estaciones pluviométricas con influencia en cada subcuenca. Por lo tanto, los valores de precipitación del hietograma, y para cada intervalo de tiempo, que se suponen uniformes en toda la superficie de cada subcuenca, se determinan como una media ponderada de las precipitaciones, de las distintas estaciones meteorológicas, precipitación media uniforme en el intervalo, la precipitación registrada en el intervalo y estación, el área de influencia de la estación, y el número de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de análisis (34).

#### *1.3.4 Sistemas de información geográfica.*

Sistema de información geográfica (SIG ó GIS por sus siglas en inglés) es un conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, ordenar y manipular datos espaciales que representan al mundo real. Tales datos se consideran como un conjunto de mapas de una misma porción de territorio, en los que una zona concreta tiene la misma localización (mismas coordenadas geográficas) en todos los mapas. De esta forma resulta posible realizar un análisis de sus características espaciales y temáticas, para obtener un mejor conocimiento de dicha zona. (35)

Este tipo de sistemas debe cumplir con los objetivos de almacenar, manejar y manipular grandes volúmenes de datos espacialmente referenciados, vinculando diversas bases de datos. De esta forma, podrá proveer los medios para llevar a cabo análisis de dichos datos que incluyen la componente de posición geográfica, organizándolos y administrándolos de tal forma que la información sea fácilmente accesible a los usuarios.

La información que se maneja son datos geográficos que pueden ser analizados únicamente desde el punto de vista temático, y espacial con sus características geométricas puras, o simultáneamente los dos aspectos. Para ello se pueden usar dos modelos de análisis de datos:

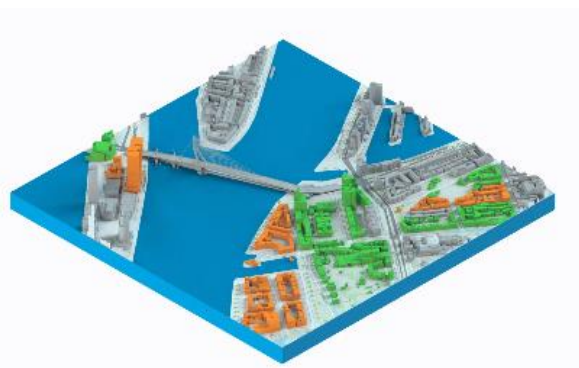
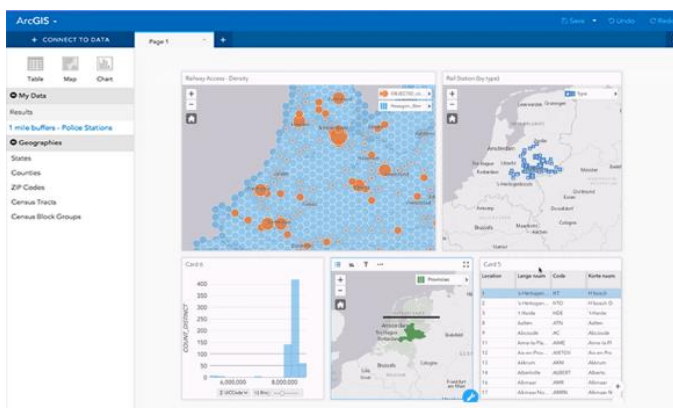
- *Modelo raster (Archivo shp)*: Presupone el dividir el espacio geográfico en elementos discretos, de forma regular, contigua y mutuamente exclusiva e indivisible. Es una representación en forma de malla, y cada elemento adopta un valor único por cada atributo. (35)
- *Modelo vectorial (Archivo tipo TIN)*: Asume un espacio continuo, siguiendo la geometría euclidiana para cada objeto puntual se representa por un par de coordenadas (x,y). Los elementos lineales se representan mediante segmentos que se conectan en vértices, tomando de ellos las coordenadas (x,y). Mientras que los polígonos son áreas que se representan por las líneas que los delimitan. (35)

El resultado de los modelos, se divide en una serie de capas lógicas de información. Se forman colecciones homogéneas de representaciones que es posible administrar con capas, de tal forma que se puede describir la distribución de una variable, representándola en una extensión geográfica. Es decir, que el uso de datos SIG relativamente sencillos (puntos, líneas, polígonos y rásters), desemboca en combinaciones tomando como base su ubicación, es decir, el georreferenciamiento para que se mezclen en un mapa o se muestren superpuestos mediante operaciones de geoprocésamiento como la superposición de polígonos. (36).

- ArcGIS®

Es un sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Fue desarrollado por el Environmental Systems Research Institute (ESRI) de los Estados Unidos de América, como una plataforma para crear y utilizar sistemas de información geográfica (GIS, Geographic Information System). Permite publicar dicha información de manera accesible para cualquier usuario (37).

ArcGIS (**Figura 13**) proporciona herramientas contextuales para el mapeo y el razonamiento espacial, cuyo propósito es explorar datos y compartir ideas basadas en la ubicación. Las aplicaciones de este sistema de softwares se engloban en familias temáticas como ArcGIS Server, para la publicación y gestión web, o ArcGIS Móvil para la captura y gestión de información en campo. ArcGIS Desktop, incluyen herramientas como ArcReader, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcScene y ArcGlobe, además de diversas extensiones. ArcGIS for Desktop se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades y costo: ArcView, ArcEditor y ArcInfo. (37).



**Figura 13:** Ejemplos de la plataforma gráfica del software ArcGIS, (36).

El geoprocesamiento surge en torno al concepto de los tipos de datos. Cada parámetro de herramienta posee un tipo de datos asociado que define el contenido de la variable. Algunos tipos de datos simples son cadenas de texto (cualquier conjunto de caracteres alfanuméricos), booleanos (un valor verdadero/falso) y largos (un valor entero entre -2.147.483.648 y 2.147.483.647). Además de estos tipos de datos simples, existen muchos otros tipos de datos creados específicamente para los datos hallados en ArcGIS, como por ejemplo, campo, sistema de coordenadas y extensión. (37).

Se debe evitar procesar los datos con un sistema de coordenadas desconocido ya que es posible que las tolerancias predeterminadas no sean apropiadas para la herramienta. La Tolerancia XY predeterminada para un sistema de coordenadas desconocido es 0,001 unidades; éste es un valor extremadamente grande si las coordenadas de los datos se encuentran en un sistema de coordenadas geográficas donde una unidad (grados decimales) representa hasta 110 kilómetros de distancia en la superficie de la tierra, lo que significa que la tolerancia que se utiliza para el procesamiento puede ser de hasta 110 metros. (38).

Este sistema desarrolla el modelado avanzado de superficies utilizando métodos deterministas y geoestadísticos, mediante el análisis exploratorio de datos espaciales, el análisis estructural (cálculo y modelado de las propiedades de superficie de ubicaciones cercanas), y la predicción de superficie y evaluación de resultados.

En general, utiliza puntos de muestra del lugar de interés y crea (interpola) una superficie continua. Los puntos de muestra pueden ser mediciones de algunos fenómenos, como por ejemplo, la fuga de radiación de una planta de energía nuclear, un derrame de petróleo o alturas de elevación. De esta manera se obtiene una superficie usando los valores de las ubicaciones medidas para predecir valores en cada ubicación de campo. (39).

Las técnicas de interpolación utilizadas pueden agruparse en: deterministas y geoestadísticas. Todos los métodos se basan en la similitud de puntos de muestra cercanos para crear la superficie. Las técnicas deterministas usan funciones matemáticas para la interpolación. La geoestadística se basa en métodos estadísticos y matemáticos, que se pueden usar para crear superficies y evaluar la incertidumbre de las predicciones. (39).

## ***1.4 MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS***

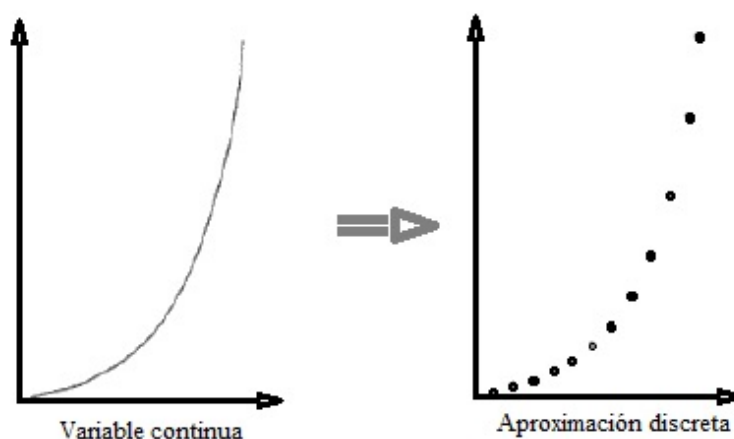
La modelación matemática de fluidos consiste en conocer los valores que toman las variables características de un sistema (por ejemplo: profundidad, velocidad, caudal, etc.) a partir de la aplicación de métodos numéricos para dar solución a un sistema de ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La modelación matemática es siempre una aproximación a la realidad, cuyos resultados dependerán de los datos de inicio y de la metodología implementada en el esquema numérico utilizado para la resolución de dicho sistema de ecuaciones, que modela al fenómeno real que se está estudiando. (40)

Este proceso también depende de la capacidad de cómputo con la que se cuenta, hoy en día se pueden estudiar caso que hace años parecían inabordables, así como del desarrollo del cálculo numérico en general y de la modelación numérica en áreas de conocimiento afines. Por ejemplo, el estudio de la mecánica de gases ha contribuido en la mejora de técnicas de discretización y esquemas numéricos específicos que luego han podido ser readaptados a problemas concretos, como es la hidrodinámica de flujos estacionarios o transitorios.

La discretización (**Figura 14**) consiste en establecer puntos en las que las variables están definidas por una malla numérica, que es esencialmente una representación puntual del dominio, el cual puede ser una distribución espacial o temporal, sobre ella se resuelve el problema con el fin de obtener una solución numérica. Dicha malla divide el dominio en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, nodos, etc.). El mallado espacial presenta mayor complejidad que el temporal, debido a que se



tienen tres dimensiones, el dominio puede ser de geometría compleja o simple, y su tamaño depende de la capacidad de procesamiento computacional con la que se cuente. (41)



**Figura 14:** Discretización de una variable, (41).

En el caso específico del estudio de ríos, como es la modelación de valores de las velocidades y niveles de agua, se usan modelos unidimensionales en estado estacionario que gradualmente varían con respecto a una variable independiente, manteniendo un fondo fijo. Este tipo de modelos se basan en métodos numéricos relativamente simples pero eficaces, pudiendo incorporar elementos como cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación, así como singularidades tales como diques, puentes, pasos bajo vía, etc.

Existen fenómenos más complejos que requieren un enfoque bidimensional, es decir, donde predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, lo que conduce al desarrollo de los esquemas bidimensionales. Para ello se pueden hacer distintas aproximaciones según el caso de estudio, por ejemplo, un problema fluvial o de ingeniería marítima.

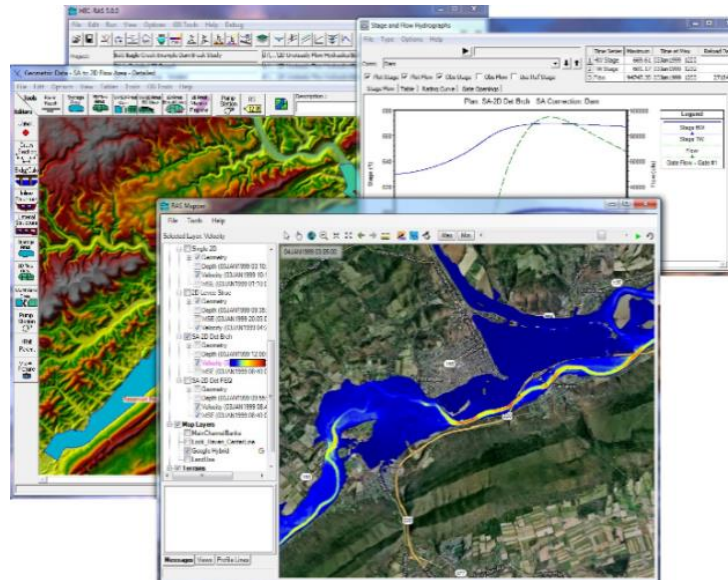
Actualmente existen herramientas informáticas comerciales y libres, relativamente sencillas de utilizar, que incorporan los modelos y algoritmos matemáticos desarrollados por grupos de investigación universitarios o industriales, con esquemas de resolución novedosos que permiten simular de manera muy exacta fenómenos de transporte de fluidos diversos, y que pueden modificarse para adaptarse a las particularidades de cada problema.

A continuación se describen dos paquetes de cómputo comercial que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo y que tienen prestigio en el ámbito mundial.

#### 1.4.1 HEC-RAS

Es un sistema creado por el Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) que pertenece al cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos de América (USACE), el cual cuenta con el Corps Water Management System (CWMS) que es el sistema automatizado de información. Puede desarrollar cuatro tipos de análisis en ríos: modelación de flujo en estado estacionario, modelación de flujo en estado transitorio, modelación del transporte de sedimentos, y análisis de calidad de agua. (42) (**Figura 15**).

Está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para una red completa de canales naturales o artificiales, áreas de desbordamientos o llanuras de inundación, áreas protegidas por diques, etc.



**Figura 15:** Ejemplo de pantallas del software HEC-RAS, (42).

Los datos de entrada que se pueden alimentar en tiempo real incluyen: etapa del río, elevación del reservorio, precipitación, pronósticos cuantitativos de precipitación y otros parámetros hidrometeorológicos, que se utilizan para derivar la respuesta hidrológica a lo largo de un área de cuenca, incluidos los flujos futuros de reservorios a corto plazo y los flujos locales descendentes no controlados.

Los flujos del modelo de operación del cuerpo de agua se procesan para generar propuestas que permitan cumplir con el uso adecuado del mismo. Luego, con base en los flujos totales esperados en el sistema fluvial, se calculan los perfiles de los ríos, se mapean las áreas inundadas y se analizan los impactos de las inundaciones.

Los perfiles de superficie de agua con flujo permanente, es una forma del sistema de modelado que puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico o un solo segmento del río. Esta componente puede modelar perfiles de superficie de agua subcríticos, supercríticos y en combinación transcrito.

Para lo anterior, el procedimiento computacional básico se basa en la solución de la ecuación de balance de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan por fricción (ecuación de Manning) y contracción/expansión (coeficiente multiplicado por el cambio de velocidad). La ecuación de momentum, se utiliza en situaciones que incluyen el cálculo del régimen de flujo mixto (saltos hidráulicos móviles), así como en la hidráulica de puentes y la evaluación de perfiles en confluencias fluviales (uniones de corriente). (43)

Los efectos de varias obstrucciones como puentes, alcantarillas, presas, diques, compuertas y otras estructuras en la zona de inundación se pueden considerar en los cálculos bajo ciertas hipótesis. El sistema de flujo de estado estacionario está diseñado para evaluar áreas de inundación. También se puede evaluar el cambio en los perfiles de la superficie del agua debido a las modificaciones del canal.

El cálculo de transporte de sedimentos es otra componente del sistema de modelado, que se usa para estimar la evolución del fondo y de la sección transversal del río, así como evaluar procesos físicos como



erosión y el depósito del material sólido, durante periodos de tiempo cortos como avenidas y largos en función de la variabilidad y permanencia del flujo.

Lo anterior se calcula mediante la discretización de la fracción de tamaño de grano, lo que permite la simulación de la clasificación hidráulica. Las principales características incluyen la capacidad de modelar una red completa de corrientes, dragado de canales, diversas alternativas de diques e intrusiones. Para ello se usan las ecuaciones de transporte y difusividad aplicadas a los sedimentos. (43)

En cuanto a los perfiles de superficie de agua de flujo constante, se trata de una componente del sistema de modelado que está hecha para calcular los perfiles de la superficie del agua en un flujo gradualmente variado. El sistema puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico o una sola zona de un río, todo bajo un régimen de flujo subcrítico, supercrítico o mixto. (43)

En cuanto a la simulación de flujo transitorio o inestable, se cuenta con una componente de modelado que es capaz de simular en una dimensión, dos dimensiones o combinación de ambas a través de una red completa de canales abiertos, llanuras de inundación y salidas aluviales. Esta componente de flujo transitorio, se puede utilizar para cálculos de régimen de flujo mixto, supercrítico y supercrítico mixto (subcríticos, supercríticos, saltos hidráulicos y extracciones). (43)

Una de las componentes de este software es CWMS, que permite la evaluación de cualquier número de alternativas de operación antes de que se adopte un escenario de pronóstico final y una decisión de gestión. Por ejemplo, se pueden considerar varias cantidades de precipitación futuras alternativas, se puede alterar la respuesta hidrológica, se pueden investigar las reglas de liberación del cuerpo de agua y se puede evaluar la obstrucción alternativa de un puente, la integridad de un dique u otras condiciones del río. (43)

El sistema enfatiza la visualización de información en tiempo y espacio. La interfaz de usuario principal de CWMS () está basada en mapas para proporcionar una referencia espacial clara para la cuenca hidrográfica y la información de modelado. CorpsView, una herramienta de visualización espacial desarrollada por USACE basada en software GIS, proporciona una interfaz de usuario directa para los productos GIS y la información asociada de atributos espaciales.

El almacenamiento de datos se lleva a cabo por medio de archivos simples de texto (ASCII y binarios). Los datos iniciales de ingreso se separan en categorías de proyecto, plan, geometría, flujo estacionario, flujo transitorio, flujo cuasi-estacionario, sedimentos y calidad del agua.

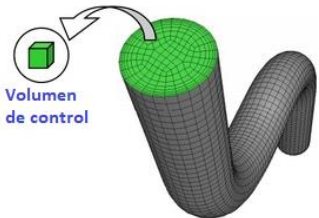
#### *1.4.2 Ansys Fluent*

Se trata de un software de dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics), que es una herramienta para la predicción de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas y fenómenos relacionados, lo que se logra al resolver numéricamente el conjunto de ecuaciones matemáticas gobernantes: conservación de la masa, conservación de momento, conservación de energía, conservación de especies y efectos de las fuerzas cuerpos. (44)

Los resultados de un análisis con CFD son relevantes en estudios conceptuales de nuevos diseños, en el desarrollo detallado de productos, solución de problemas y rediseños. Este tipo de análisis complementa pruebas y ensayos experimentales, reduciendo costos y esfuerzos para la adquisición de datos.

La forma de solución que emplea ANSYS CFD se basa en el método de volumen finito: el dominio se discretiza en un conjunto finito de volúmenes de control, y las ecuaciones generales de conservación (de transporte) para masa, momento, energía, especie, etc. se resuelven en este conjunto de volúmenes de

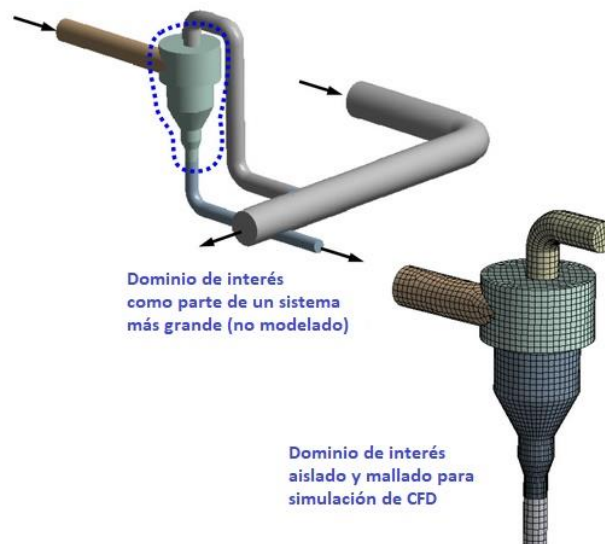
control, ecuaciones diferenciales parciales se discretizan en un sistema de ecuaciones algebraicas, y estas últimas se resuelven numéricamente para obtener un campo de soluciones (**Figura 16** y **Figura 17**) (45)



Volumen de control

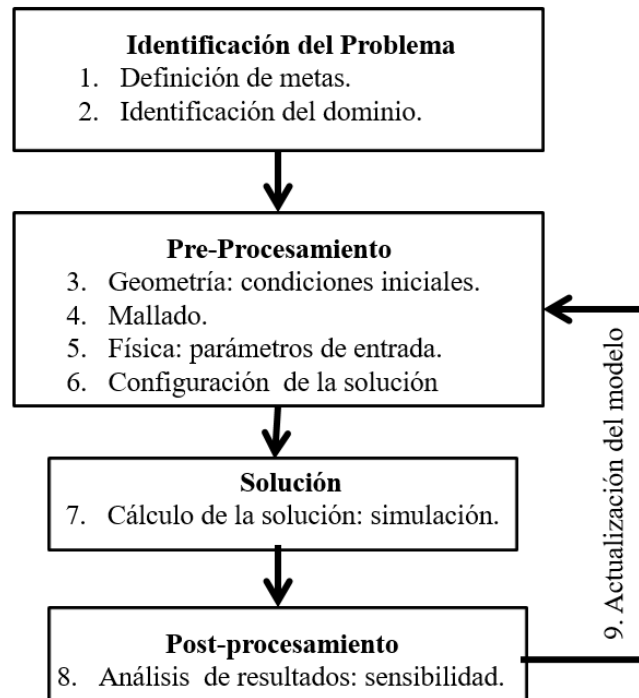
$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Transitorio}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generación}}$$

**Figura 16:** Esquema del tipo de ecuación que se utiliza para llegar a un campo de soluciones con ANSYS-Fluent, (45)



**Figura 17:** Esquema de mallado para la modelación de un sistema ya aislado, (45)

Como resultado final, y tomando en cuenta las condiciones iniciales y de frontera establecidas, se obtiene la solución del sistema de ecuaciones que es monitoreada para determinar la convergencia de las iteraciones realizadas, minimizando así el error de solución. Así se puede llegar a obtener los valores de las variables seleccionadas para simular su comportamiento bajo las condiciones antes mencionadas. La **Figura 18** muestra un esquema general de la secuencia de pasos que se deben llevar a cabo para lograr un buen modelado mediante CFD.



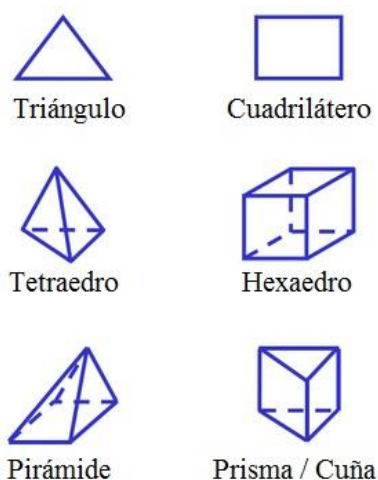
**Figura 18:** Secuencia general para el modelado con CFD, (45).

La sensibilidad de los resultados obtenidos se comprueba para determinar la exactitud con respecto a valores experimentales u otras simulaciones. De esta manera se toma la decisión de reportar resultados o corregirlos.

La teoría básica de la modelación con CFD son las ecuaciones de la dinámica de fluidos bajo un esquema Reynolds Averaged Navier-Stokes RANS de las ecuaciones de Navier-Stokes, que se usan para modelar parámetros como velocidad, temperatura y presión. Los contornos de velocidad pueden utilizarse posteriormente para trazar las trayectorias de las diferentes regiones en un perfil de flujo, es decir, de los volúmenes de fluido que se estudian según se haya planteado la geometría inicial.

En el caso particular de ANSYS-FLUENT, se requiere definir la geometría del modelo a simular por medio de la herramienta “Design Modeler”, de forma tal que se fija el dominio del fluido sobre el cual se creará la discretización. Adicionalmente, este módulo puede importar la geometría de otros softwares como es SolidWorks. Una vez que se cuenta con la topología se procede a crear la malla del modelo por medio de la herramienta “Meshing”, es decir, se discretiza el dominio definido anteriormente, por medio del método de volúmenes finitos que pueden ser de diferentes tipos según se muestra en la **Figura 19**. Con la combinación de estas formas, se puede fragmentar cualquier geometría ajustándolos a la topología del dominio a modelar. (46).

Una vez que se ha definido la geometría y se ha llevado a cabo el mallado se procede a seleccionar los parámetros, ecuaciones, modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución para llevar a cabo la simulación. Una vez hecha la simulación y con una solución convergente o divergente, se procede a verificar los resultados y se decide si se realimentan los parámetros iniciales o se procede a “dar por buenos” los resultados. Finalmente, si los resultados son aceptados, se pueden generar gráficas y diversos tipos de reportes para su uso en el proyecto de origen.



**Figura 19:** Elementos geométricos con los que se puede crear una malla para la discretización del dominio de una simulación, (45).

### 1.5 MICRO Y PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

Es importante destacar que la Ley de Transición Energética (LTE), publicada el 24 de diciembre de 2015, establece en el artículo tercero transitorio las metas de participación mínima de las energías limpias en la producción eléctrica nacional, tal que para el año 2018 debería ser del 25%, mientras que para el 2021 de 30% (47).

La definición de energías limpias se plantea en la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), publicada el 11 de agosto de 2014, en el artículo 3, fracción XXII, incluye a todas las tecnologías para generación de electricidad que tienen bajas emisiones de gases de efecto invernadero y otras condiciones de tipo ambiental, tal que las centrales hidroeléctricas entran en esta definición así como en la de energías renovables (48).

Hoy en día las energías renovables forman parte de la diversificación energética para los esquemas de generación distribuida que el gobierno federal ha establecido a través de diferentes instancias legales, como es el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031 (PRODESEN) (49).

Para el aprovechamiento eléctrico de los recursos hidráulicos, es importante cuantificar el tamaño del recurso hídrico a partir del potencial de generación que éste posea. La Ley de Transición Energética (LTE), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015, establece en el artículo 3° fracción XVI la definición legal de Energías Renovables (47).

En el caso particular de las pequeñas y micro centrales, se consideran como fuentes de energía renovable, lo que establece la LTE en el inciso c) de la fracción XVI del artículo 3°: “*el movimiento del agua en cauces naturales o en aquellos artificiales con embalses ya existentes, con sistemas de generación de capacidad menor o igual a 30 MW o una densidad de potencia, definida como la relación entre capacidad de generación y superficie del embalse, superior a 10 watts/m<sup>2</sup>*” (47).

México cuenta con gran cantidad de cauces de ríos permanentes a lo largo del año, susceptibles de ser aprovechados en pequeñas centrales hidráulicas. En el caso particular de este proyecto, el cauce del río La Gavia en el intervalo antes definido, podría contar con el potencial para aprovecharse con fines energéticos. Para ello es importante conocer el estado del arte de las tecnologías que permitirían tal aprovechamiento (50).

- **Descripción general de pequeñas centrales y estado del arte.**

Se podría plantear una clasificación del tamaño de las centrales hidráulicas tomando en cuenta la definición establecida en la LTE y argumentos que utilizan las grandes empresas del sector de energía, sin embargo, es importante aclarar que no hay una clasificación oficial internacional para la división. Según la capacidad instalada de generación, para México las centrales hidráulicas se pueden clasificar de la siguiente manera: (47), (51)

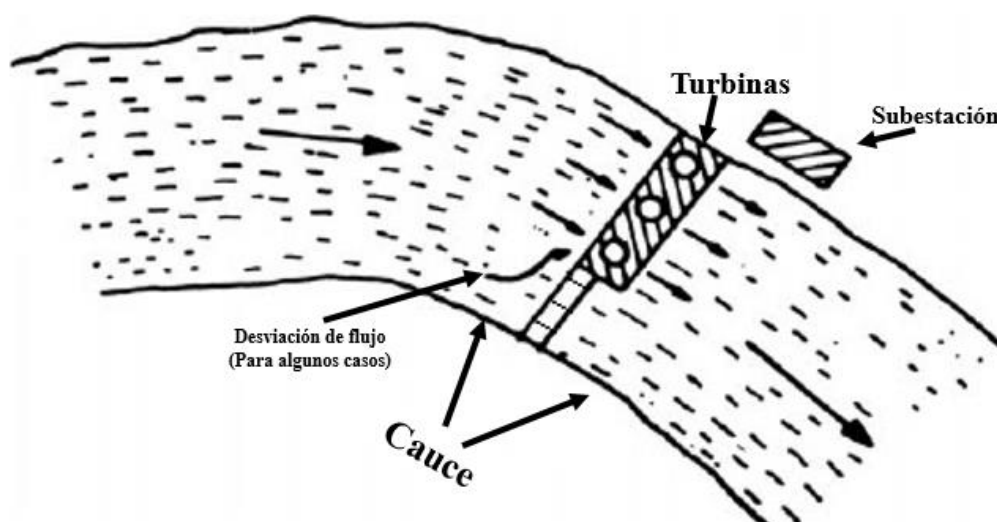
- Grandes centrales: potencia  $> 30$  MW
- Pequeñas centrales:  $10 \text{ MW} < \text{potencia} \leq 30 \text{ MW}$
- Mini centrales:  $1 \text{ MW} < \text{potencia} \leq 10 \text{ MW}$
- Micro centrales: potencia  $\leq 1 \text{ MW}$

Las pequeñas y micro centrales operan con el mismo principio que las grandes centrales hidroeléctricas, utilizando diversos mecanismos principalmente por la turbina hidráulica, que es un dispositivo que convierte la energía contenida en cauces a energía mecánica de rotación. Esta energía puede ser transmitida a un generador eléctrico, que a su vez se conecta a un transformador para poder transmitir la electricidad a un sistema de consumo (52).

Otra clasificación de centrales hidráulicas se puede plantear según el tipo de aprovechamiento del cauce, el cual depende del terreno y condiciones meteorológicas de donde se sitúa. A continuación se da una clasificación general tomando en cuenta este criterio:

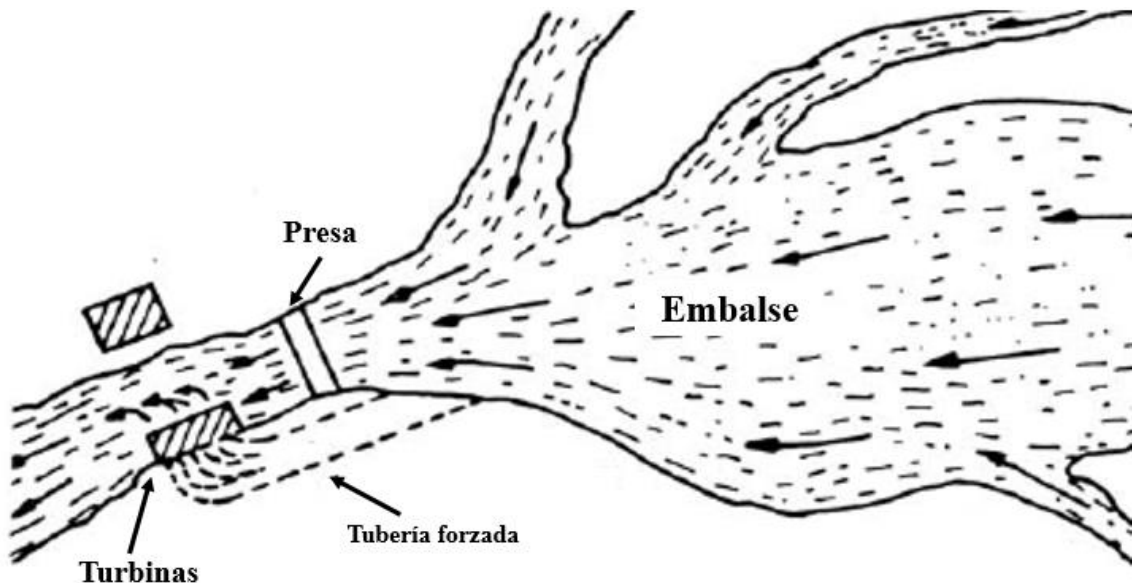
- a) **Centrales de agua fluyente (centrales sin embalse):** Son aquellas en las que la energía del cauce se puede utilizar directamente para accionar la turbina. Se pueden clasificar en centrales con reserva diaria o sin reserva. En este caso el terreno no tiene mucho desnivel y se requiere que el caudal del río sea relativamente constante a lo largo del año (**Figura 20**) (51).

Durante la temporada de lluvias alcanzan su máximo potencial de generación, dejando pasar el agua excedente a su capacidad. Mientras que en la época de estiaje, con el caudal del río al mínimo, por lo tanto la potencia también cae al valor mínimo.



**Figura 20:** Esquema de una central de agua fluyente, (53).

- b) **Centrales con embalse (centrales de regulación):** Son aquellas que cuentan con un almacenamiento de agua por la construcción de un embalse formando lagos artificiales. El nivel el agua está muy por arriba del de las turbinas. De esta forma, es posible regular la cantidad de agua que pasa por ellas permitiendo producir electricidad a lo largo del año, siempre y cuando se haga una buena gestión del recurso hídrico (**Figura 21**). (51)



*Figura 21: Bosquejo de una central con embalse, (53).*

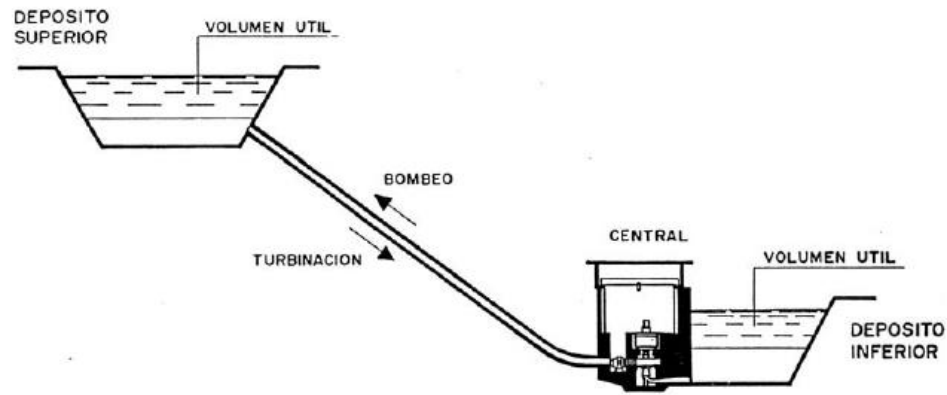
Este tipo de centrales se pueden clasificar en:

- Centrales a pie de presa. Generalmente se ubican exactamente en la base de una presa que se localiza en una sección de río con una altura considerable.
- Centrales por derivación de aguas. En ellas, el cauce del río se desvía por una pequeña presa y conducida por un canal hasta un pequeño depósito llamado cámara de carga o presión. A partir de ella, el agua es conducida por una tubería hasta la turbina, que se encuentra más abajo del nivel de la cámara. Posteriormente el agua se devuelve al río mediante un canal de descarga. Este tipo de centrales puede tener una diferencia de niveles mucho mayor (51).

- c) **Centrales de acumulación por bombeo (centrales reversibles):** Son aquellas que cuentan con dos reservas de agua (embalses) situadas a diferente nivel. De tal forma que funcionan según la demanda de electricidad. Con demanda alta, el agua fluye de arriba hacia abajo para generar electricidad, mientras que con demanda baja, el agua fluye de abajo hacia arriba con una bomba para almacenar energía (**Figura 22**) (53).

Para este sistema, la central dispone de turbinas reversibles, tal que puedan funcionar como bombas y los generadores como motores.

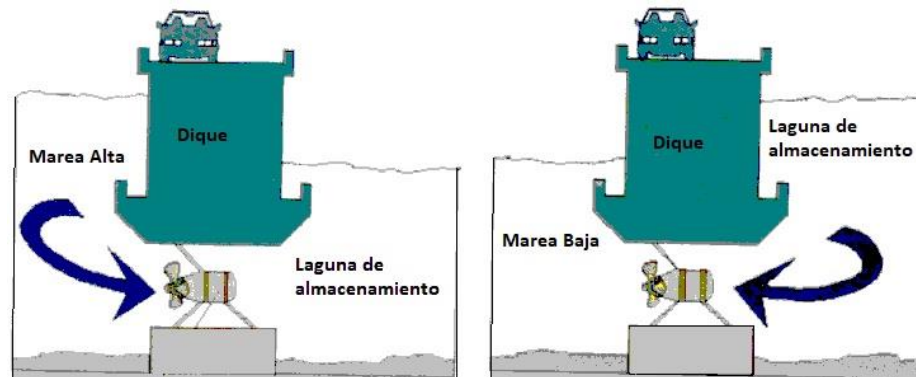




**Figura 22:** Bosquejo de una central de acumulación por bombeo, (53).

Cabe mencionar que, la cantidad de energía eléctrica obtenida al turbinar el agua, es menor que la requerida para bombear el agua hacia arriba, esto debido a las pérdidas de energía asociadas a las irreversibilidades del doble proceso de conversión. Por lo que el rendimiento de estas centrales es menor. Su ventaja es de índole económica, ya que consume energía barata y genera energía cara en momentos de consumo pico (53).

- d) **Centrales mareomotrices:** Son aquellas que utilizan la energía de las mareas al aprovechar la diferencia de alturas que se produce entre la marea alta (acumulación) y la marea baja (generación) de un determinado sitio. La diferencia de alturas puede ser desde los 2 m hasta los 15 m en algunos casos. Su principal desventaja son los altos costos de inversión para la construcción de un dique en el mar (**Figura 23**) (53).



**Figura 23:** Bosquejo de una central mareomotriz, (53).

Es importante mencionar que este tipo de central, puede generar electricidad tanto en la carga de la laguna de almacenamiento, como en la descarga.

En nuestro país, existe un total de 85 centrales hidráulicas registradas, ante la Comisión Reguladora de Energía y la Secretaría de Energía que están interconectadas al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). La **Tabla 5:** Número de centrales hidráulicas en México muestra la cantidad de centrales según su potencial de generación, la capacidad instalada total y la generación eléctrica del año 2016 (50). La lista completa de hidroeléctricas se encuentra en el **Anexo 1**.

**Tabla 5:** Número de centrales hidráulicas en México, (50).

Tipo	Cantidad	Capacidad instalada [MW]	Generación [GWh]
Grande	34	12,148	29,244
Pequeña	16	331	1,254
Mini	26	131	461
Micro	9	9	35
Total	85	12,619	30,994

## 1.6 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

El término de “impacto ambiental” está definido por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como la “*modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.*” Adicionalmente, incluye la definición de “desequilibrio ecológico” como “la alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos.” (54).

De tal forma que la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), es una herramienta de política ambiental, que permite llevar a cabo un análisis de tipo preventivo dentro de un proyecto productivo, un conjunto de ellos, un plan o programa determinado. Sirve para identificar los posibles impactos negativos, con el fin de evaluar los enfoques alternativos, así como de diseñar e incorporar medidas adecuadas de prevención, mitigación, gestión y monitoreo. Ayuda a garantizar la protección, mantenimiento y rehabilitación de los hábitats naturales y de sus funciones en el contexto de los proyectos de campo (55).

La evaluación de impacto ambiental es un procedimiento de carácter preventivo, orientado a informar al promovente de un proyecto o de una actividad productiva, acerca de los efectos al ambiente que pueden generarse con su implementación o construcción. Es un elemento correctivo de los procesos de planificación y tiene como finalidad modular y/o atenuar los efectos negativos del proyecto sobre el ambiente.

La EIA incluye la recopilación de información y la consulta a fuentes autorizadas, para obtener evidencias de la capacidad de generación de alteraciones por parte del proyecto y, así conocer cuál es la capacidad de carga del ambiente del área donde se ubicará el proyecto. Con lo anterior, la EIA debe permitir establecer propuestas de acciones de protección al ambiente y de corrección o mitigación de las alteraciones que pudieran producirse.

Se busca que se garantice, de la mejor manera posible, el equilibrio y las características del ambiente después de la puesta en operación del proyecto o actividad objeto del estudio y, colateralmente, preservar la salud y el bienestar del hombre, todo ello llevado a escenarios de largo plazo.

El objetivo inmediato de la EIA es servir de ayuda en la toma de decisiones. Para ello, sus resultados habrán de presentarse con un orden lógico, de forma objetiva y fácilmente comprensible. Así, los evaluadores que analicen el documento, encargados de sustentar la decisión de la autoridad, determinen la conveniencia, o no, de que el proyecto estudiado se ponga en operación. Además de identificar, prevenir e interpretar los efectos que un proyecto puede tener en el ambiente. Un objetivo fundamental de la



Evaluación del Impacto Ambiental, es definir y proponer la adopción de un conjunto de medidas de mitigación que permitan atenuarlos, compensarlos o incluso suprimirlos. (56)

En síntesis, este proceso multidisciplinario, debe constituir la etapa previa (con bases científicas, técnicas, socioculturales, económicas y jurídicas) a la toma de decisiones acerca de la puesta en operación de una actividad o un proyecto productivo determinado.

### **Etapas del proceso para el desarrollo de estudio de impacto ambiental.**

De manera general, el desarrollo de una EIA está formado por un conjunto de etapas y tareas que deberán cumplirse de manera secuencial. A continuación se hace una breve descripción de ellas (56):

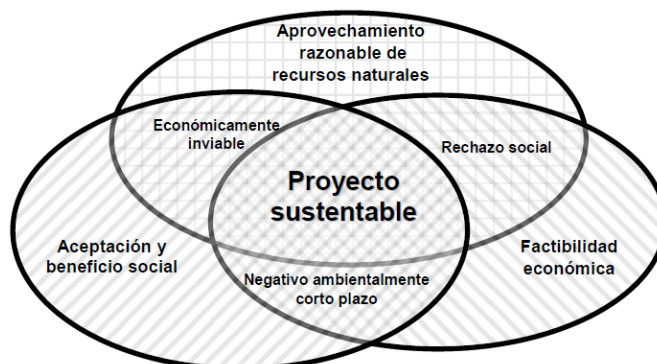
1. **Descripción del proyecto o actividad a realizar:** en esta etapa se analiza y se describe al proyecto o a la actividad, destacando, desde el enfoque ambiental, sus principales atributos y sus debilidades más evidentes.
2. **Desglose del proyecto o actividad en sus partes elementales:** esta tarea debe realizarse de manera uniforme y sistemática para cada una de las cuatro fases convencionalmente aceptadas: preparación del sitio, construcción, operación y abandono del proyecto. Deberá hacerse una prospección de las actividades relacionadas al proyecto y de aquellas otras que serán inducidas por él, siempre con el objetivo de identificar los impactos al ambiente.
3. **Descripción del estado que caracteriza al ambiente, previo al establecimiento del proyecto:** Descripción del medio físico en sus elementos bióticos y abióticos, en un ámbito extenso y sustentado tanto en evidencias reportadas en la literatura especializada como en observaciones directas en campo. En esta etapa se incluye el estudio del medio social y económico de la zona donde se establecerá el proyecto o donde se desarrollará la actividad.
4. **Elementos más significativos del ambiente:** este apartado resume la información que permite determinar el significado que tienen los elementos más relevantes del ambiente, previamente analizados, para su conservación. Habrán de definirse y aplicarse los criterios acordes a la magnitud de la importancia del ambiente, tales como diversidad, rareza, perturbación o singularidad, la valoración que se haga de cada rubro deberá tener un enfoque integral.
5. **Ámbito de aplicación del Estudio de Impacto Ambiental:** el ámbito de aplicación del Estudio definirá el alcance que tendrá éste, para cada uno de los elementos anteriormente descritos. Su incidencia o no con áreas naturales protegidas o con planes parciales de desarrollo urbano o del territorio, así como el cumplimiento de Normas Oficiales Mexicanas vigentes.

En el artículo 28 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) se establece que la EIA “es el procedimiento a través del cual la SEMARNAT establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente.” (54)

De manera más explícita, en el artículo 5 del Reglamento de la LGEEPA en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental, se establece quiénes están obligados a desarrollar una EIA con el fin de tener autorización de la SEMARNAT. En particular, las obras hidráulicas: presas de almacenamiento, derivadoras y de control de avenidas con capacidad mayor a un millón de metros cúbicos, canales y cárcamos de bombeo; con excepción de aquellas que se ubiquen fuera de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y regiones consideradas prioritarias por su diversidad y no impliquen la inundación o

remoción de vegetación arbórea o de asentamientos humanos, la afectación del hábitat de especies incluidas en alguna categoría de protección, el desabasto de agua a las comunidades aledañas, o la limitación al libre tránsito de poblaciones naturales, locales o migratorias.

Es muy importante tener claro que la EIA no es un “trámite innecesario y costoso”, ya que es un compromiso de lograr que el proyecto productivo a construir se ajuste a límites que garanticen reducir al mínimo o evitar los efectos negativos que podrían derivar de los impactos ambientales consecuentes de dicho proyecto. De tal forma que el proyecto en curso pueda ser clasificado como “Proyecto Sustentable” de forma tal, que garantiza la viabilidad del aprovechamiento razonable de los recursos naturales, la aceptación y beneficio social, así como gozar de factibilidad económica (**Figura 24**) (57)



**Figura 24:** Esquema de condiciones para un proyecto sustentable. (57)

En el informe del EIA, conocido como Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), deberá incluirse la delimitación y análisis del sistema ambiental, así como el señalamiento de la problemática ambiental detectada en el área de influencia del proyecto productivo, el que podría acotarse a las delimitaciones regionales concretas, tales como cuenca hidrográfica, unidad de gestión ambiental zona de atención prioritaria, de tal forma que tenga una aportación real hacia un Desarrollo Sustentable.

# Capítulo 2

## 2. Materiales y métodos

En este capítulo se presenta y describe la metodología empleada para la obtención de los resultados del trabajo de investigación, así como los objetivos alcanzados. El proyecto se encuentra dividido en tres apartados principales: la variación espacio-temporal del caudal, el dimensionamiento de obra de toma y el estudio preliminar de impacto ambiental.

Se especifican los métodos utilizados para la obtención de la variación espacio-temporal del caudal en el tramo de estudio, asociando a los periodos de retorno propuestos de 2, 5, 10, 15, 20 y 50 años.

Enseguida, se presenta la descripción y justificación del uso de paquetes computacionales para el análisis de la zona de estudio, y la modelación numérica de los caudales obtenidos. Esto con la finalidad de proponer un aprovechamiento de generación hidroeléctrica de tipo mini hidráulico. Por último, se describe el procedimiento de cálculo realizado para la obtención de resultados a partir de los datos observados en las estaciones hidrométricas.

Se expone y argumenta el uso del respectivo paquete computacional utilizado para la modelación de obra de toma y con los resultados de la misma, la elección de turbina la cual cumple con los requerimientos de flujo observados a partir de la modelación, a partir de generalidades teóricas.

El estudio de viabilidad ambiental basado en las normatividad específica de NOM-001-2015CONAGUA para posibles aprovechamientos y obras de toma, basado en puntos espacio temporales para el desarrollo.

### ***2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO***

El recurso hídrico es indispensable para el suministro de agua a la población, su uso en actividades humanas como la agricultura o acuicultura, y su explotación para la producción de energía. La correcta administración del vital líquido requiere de una evaluación en torno a la cantidad y calidad, de acuerdo con el aprovechamiento o destino final. La evaluación de los recursos hídricos es una responsabilidad nacional y de las instituciones de educación superior, en conjunto de los centros de investigación dentro del ámbito competente, que debe realizarse de forma correcta y con apego a las normas y leyes vigentes en materia de agua. Con ello, es posible conocer con detalle los recursos disponibles y así administrar de forma sostenible y eficiente dichos recursos, con el fin de lograr una gestión y adecuada protección del recurso hídrico.

La correcta planificación de aprovechamiento de dicho recurso, garantiza la durabilidad y un adecuado funcionamiento de la infraestructura hidráulica, también ayuda a evaluar los impactos sociales, ambientales como económicos que generen dichos proyectos entorno a la población y ecosistemas pertenecientes o aledaños a la zona.

Una de las principales formas de aprovechamiento de los recursos hídricos en México, consiste en la generación de energía eléctrica, a través de mega obras hidráulicas cuya sustentabilidad es considerablemente baja, debido al impacto negativo provocado dentro del ecosistema en el que se desarrollan (58).

La zona de estudio del presente proyecto se enfoca en la comunidad de Benito Juárez en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, con base en el Catálogo de Localidades publicado por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en el año 2015, reporta que el 3.1% de la población no cuenta con servicio de energía eléctrica (59). El Consejo Nacional de Población (CONAPO) clasifica esta zona con un alto grado de marginación (60). Adicionalmente, no se tiene una estimación acertada del caudal del río “La Gavia”, el cual fluye por la zona, y además no se cuenta con estaciones hidrométricas cercanas para dicha estimación.

## ***2.2 HIPÓTESIS***

La modelación del flujo de agua del río “La Gavia” localizado en Almoloya de Juárez, por medio de un análisis de datos obtenidos en campo y con la aplicación de modelos teóricos, permite evaluar el recurso hídrico para valorar su posible aprovechamiento con beneficio socio-ambiental y evaluar así viabilidad en la generación de electricidad.

## ***2.3 OBJETIVO GENERAL***

Evaluar la variación temporal y espacial del caudal en el río La Gavia de Almoloya de Juárez en un tramo de 5 km antes del embalse Ignacio Ramírez, para estimar la viabilidad de aprovechamiento del recurso hídrico, mediante la elaboración de la base de datos de parámetros físicos e hidráulicos utilizando herramientas de modelado.

## ***2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

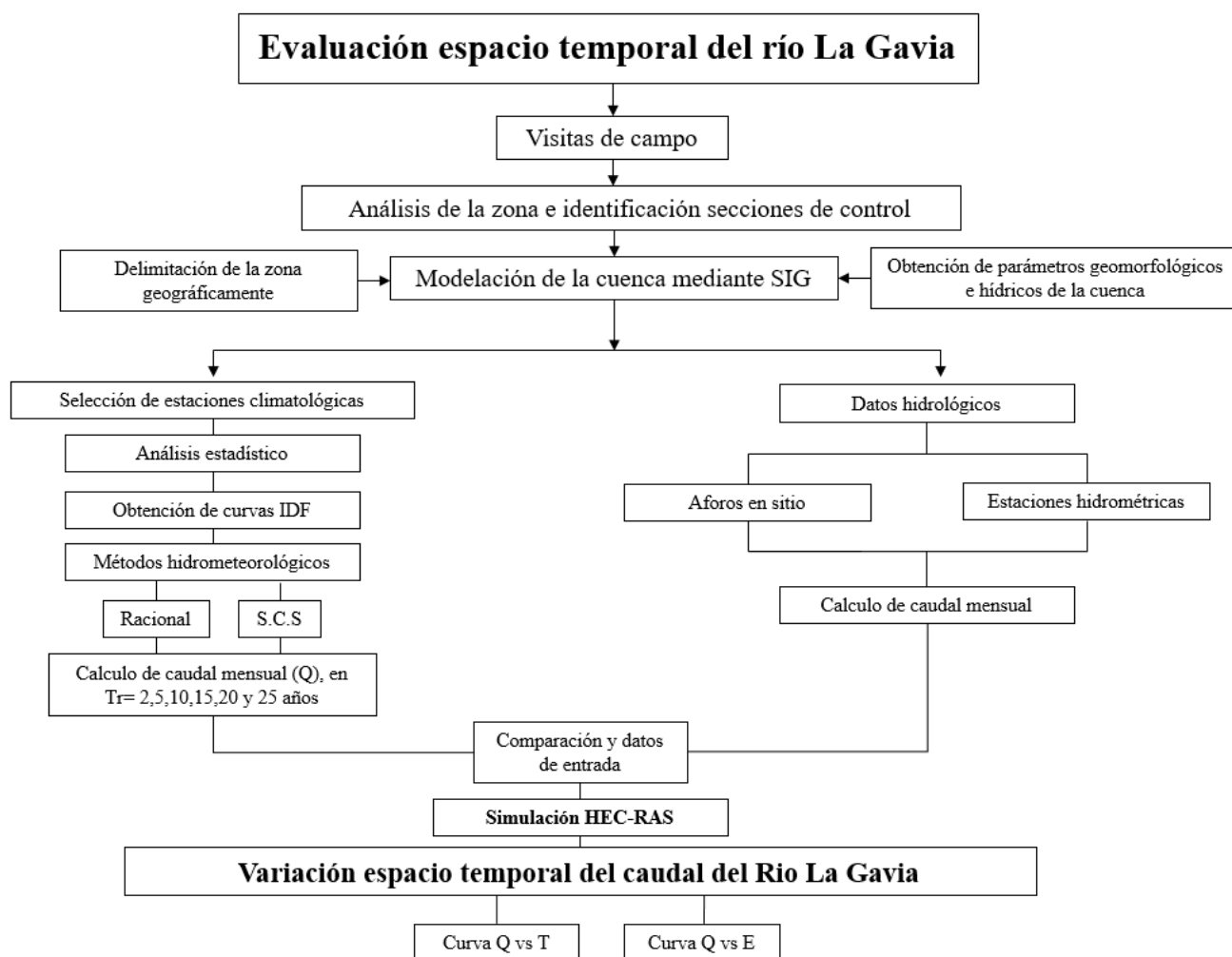
- Medir las secciones hidráulicas en los puntos estratégicos acordados en el río La Gavia, Almoloya de Juárez.
- Medir los caudales en los puntos del río La Gavia con el fin de valorar su carga.
- Comparar los datos estimados de manera teórica con datos de campo en el río.
- Modelar el comportamiento hidráulico del río La Gavia en el área de estudio.
- Definir un esquema conceptual de aprovechamiento del recurso hídrico.

## ***2.5 EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL RIO LA GAVIA.***

Los cálculos de flujo en canales a superficie libre, son recomendables realizarlos rutinariamente ya que proporcionan información clave para planificar, mantener y registrar los tipos de flujo. La selección del método del volumen a medir, dependerá de las condiciones bajo la cuales deben efectuarse y de la exactitud de las medidas requeridas, así como del equipo y los elementos que se dispongan para aforar, (61). Para ello existen distintos métodos para una sección de control como: aforo volumétrico, estructuras aforadoras, método de área-velocidad o sección-pendiente, de manera química, mediante trazadores y ecuaciones empíricas, así como métodos indirectos a través de un modelo lluvia-escurrimiento, entre otros. El método más común para realizar las mediciones ha sido el método de área-velocidad, el cual usa dispositivos acústicos y/o mecánicos, los cuales son medidores de corriente con elementos rotativos, (24).

Es importante señalar que la zona de estudio pertenece administrativamente a la RHA número VIII “Lerma - Santiago-Pacífico” de acuerdo con el Atlas de Agua en México 2016, RH número XII “Lerma-Toluca” al curso alto del río Lerma y a la cuenca número VIII “La Gavia” (28).

Para lograr la evaluación espacio-temporal del río, se realizaron visitas de campo para el análisis de la zona, con la finalidad de obtener y observar características específicas de la misma, tales como: uso de suelo, fondo del río, uso principal del recurso analizado, así como un estudio social general integrando un complemento con base en datos generados por el INEGI. Esto permitió localizar y puntualizar las secciones de control utilizadas para aforos, así como puntos de entrada y salida para el trazado de la cuenca de aportación, incluyendo las subcuencas de la misma.



**Figura 25:** Diagrama de flujo para obtención de la variación espacio temporal de la zona<sup>1</sup>.

Con la información anterior, se realizó el trazado del parteaguas de la cuenca de aportación de la zona con la implementación de SIG's, obteniendo propiedades hidrológicas y parámetros de la misma, permitiendo la identificación y selección de estaciones hidrométricas y meteorológicas de influencia. Con los datos

<sup>1</sup> Q vs T, caudal contra tirante, y Q vs E, caudal contra energía específica.

obtenidos y el análisis pertinente, se llevó a cabo la aplicación de los métodos hidrometeorológicos para el cálculo de caudales. Simultáneamente, se realizaron aforos en sitio una vez por mes durante 12 meses, y se analizaron los datos de las estaciones hidrométricas respectivamente.

Con los resultados obtenidos, se procedió a la modelación numérica de flujo de la zona con la aplicación del software HEC-RAS en 1D, calculándose la variación espacio-temporal del caudal, así como la selección de la sección óptima de aprovechamiento del recurso para generación hidroeléctrica. En la **Figura 25** se observa el diagrama de flujo aplicado para la evaluación espacio-temporal.

### *2.5.1 Trazado y obtención de propiedades morfométricas de la zona de estudio*

La delimitación de la cuenca hidrológica es indispensable para el análisis específico de la zona, ya que esto permite obtener parámetros y propiedades generales de la misma, los cuales son base para la aplicación de métodos de estimación de caudales para el caso específico, o la obtención de parámetros externos para un análisis puntual.

El trazado de la cuenca hidrológica de influencia, se inició a partir de la obtención de los modelos digitales de elevación (MDE), los cuales permitieron la representación 3D del relieve topográfico de una zona. Existen dos características esenciales que son: la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos (62). En México es posible la obtención de MDE para cualquier parte del territorio a partir del portal de INEGI, donde la resolución de los archivos utilizados en el presente trabajo es equivalente a 15x15 metros en un formato tipo raster.

Una vez obtenidos los archivos adecuados de la zona que delimitan la cuenca en estudio, mediante la aplicación de un SIG, de nombre ArcGIS® en su versión 10.2 descrito en la sección 1.3.4, se obtuvieron parámetros como: área, perímetro de la cuenca, orden de la red hídrica, pendiente de la cuenca, pendiente del cauce principal, longitud del cauce principal, entre otras. En la **Figura 26** se observa la ubicación de cuenca trazada, la cual se encuentra en la parte centro del país al noroeste del Estado de México, siendo esta de influencia hídrica ya que proporciona alrededor del 86% de agua a Almoloya de Juárez, uno de los municipios territorialmente hablando de mayor extensión (Almoloya de Juárez).



**Figura 26:** Mapa de ubicación de la Sub-cuenca La Gavia

Para lograr la delimitación del área de estudio, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Unión de archivos tipo raster, y creación del modelo vectorial (archivo tipo TIN)<sup>2</sup>.

Esto a partir de los MDE obtenidos, los cuales están conformados por seis imágenes tipo raster a escala 1:50,000, con la clave E14A37C, esto con la finalidad de tomar en cuenta todos los puntos de influencia de la zona, donde este tipo de archivos representan el valor de mallado de cada elemento. Posteriormente, es necesario generar el archivo tipo TIN, donde los elementos lineales se representan mediante segmentos que se conectan en vértices, tomando de ellos las coordenadas (x, y), mientras que los polígonos son áreas que se representan por las líneas que los delimitan (35). Con este tipo de archivo, se permitió dar las primeras acotaciones de la zona de estudio, de igual forma permitió el refinamiento de las mallas para mayor exactitud, y al ser un formato vectorial, fue posible almacenar información compatible con otros SIG's.

2. Obtención de curvas de nivel<sup>3</sup>.

Dichas curvas, permiten delimitar la zona de acuerdo con la elevación de la misma, así como las áreas y pendientes entre ellas. Así mismo, se obtuvo la pendiente total de la cuenca, lo cual permitió caracterizar la red hídrica que conforma la zona. Se utilizaron aquellas obtenidas a partir de la herramienta incluida en el SIG ya que se basan y adaptan directamente al archivo tipo TIN generado.

<sup>2</sup> Utilizar tamaños de celda adecuados a la definición de la zona.

<sup>3</sup> Las curvas de nivel se puede obtener del portal del INEGI o con la ayuda del mismo SIG.



### 3. Caracterización de la hidrología (dirección de flujo, acumulación y llenado de celdas).

Con la información brindada por las curvas de nivel, y la herramienta de hidrología de ArcGIS®, fue posible obtener la caracterización del escurrimiento de la zona y los principales puntos de la red hídrica, antes de ser acotada, así como observar de manera puntual los afluentes de influencia principal en la zona, y la ubicación del cauce en análisis. La información brindada es función de la escala de grises y fue difícil observar el cauce, ya que lo muestra de acuerdo a la cantidad de agua que estos llevan. Por ello fue necesario tomar en cuenta lo descrito en el punto 4.

### 4. Identificación del punto de drenaje de la cuenca para la eliminación de información innecesaria.

El punto de drenaje o de separación de análisis, se determinaron con las visitas de campo y la delimitación del tramo de río para ser analizado. Para este caso, se estableció un tramo de 5 km localizado aguas arriba de la presa “Ignacio Ramírez”, ya que en esta termina el análisis de batimetría descrito en la sección 2.5.2. Para ello, fue necesario localizar el punto en un archivo de tipo KMZ, debido a que identificarlo de acuerdo con la información proporcionada por el SIG no es de fácil visualización. Al auxiliarse del archivo KMZ y la georeferenciación del mismo se obtuvo una aproximación del punto por lo que fue colocado específicamente sobre la red hídrica<sup>4</sup>.

Para este apartado en específico, se tuvieron en cuenta tres puntos de delimitación de información. Uno para el caso general de la cuenca, la cual da información de ubicación espacial dentro del territorio tomando el punto de delimitación el final de la batimetría. El segundo punto fue la ubicación del punto de aforo A (ubicado en la estación Puente Los Velázquez), y el tercero el punto de aforo B (ubicado en el puente perteneciente a la población Benito Juárez) general, esto con la finalidad de obtener resultados más acertados en la aplicación de los métodos de cálculo de caudal.

### 5. Análisis espacial para la obtención de parámetros de área, perímetro, y pendiente de la cuenca.

Una vez delimitado lo anterior con las herramientas de *spatial analysis*, *slope*, *hydrology* y *map algebra*, con los archivos compatibles para las herramientas, se obtuvieron los parámetros necesarios en forma de tabla dentro del SIG, por lo que fue necesario guardarlos en un archivo de tipo .xls para su posterior procesamiento.

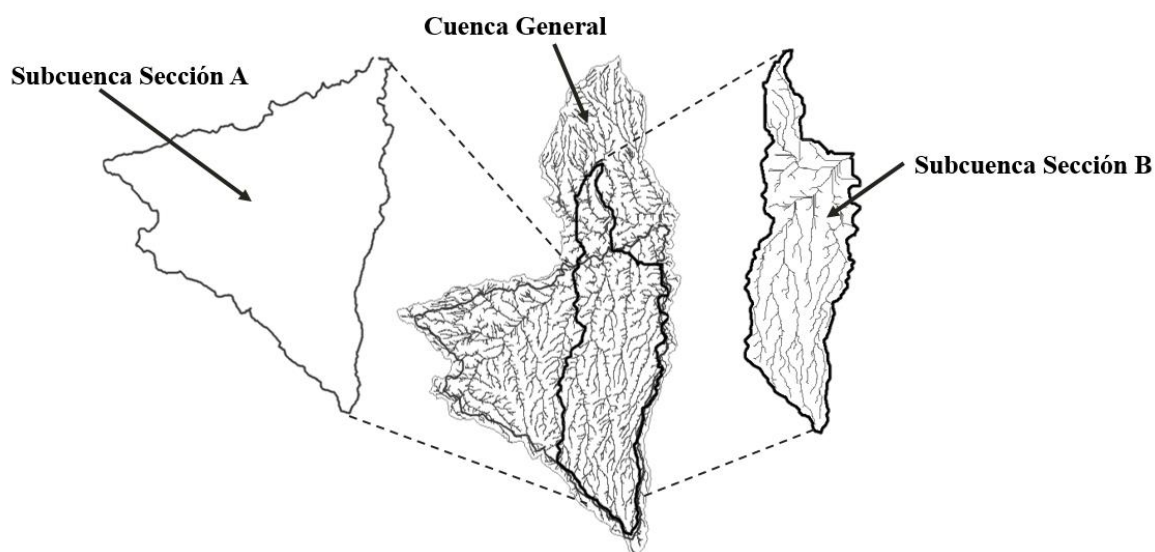
### 6. Análisis de la red hídrica auxiliado por el SIG.

Con las herramientas de *map algebra* e *hydrology*, se determinaron las características tales como: orden de corriente de la red hídrica, pendiente del cauce principal, longitud del mismo, entre otras. Las cuales son necesarias para la realización de cálculos importantes durante el desarrollo del proyecto, así como para la aplicación de los respectivos métodos de estimación de caudal.

Durante el desarrollo de los distintos pasos descritos, se obtuvieron archivos, shapes y rasters, que ayudan a la visualización de la zona de estudio mostrando por la escala de color, características como: el relleno de depresiones, dirección de escurrimiento, acumulación de flujo, generación de la cuenca de aportación, red hídrica, orden de corriente de la red hídrica, afluentes totales, entre otros. Esto fue llevado a cabo en otras dos ocasiones acotándolo con los puntos descritos en el apartado 4 de esta sección y mostrado en la **Figura 27** para su comprensión. Se observa las alternativas de subcuencas trazadas, con base al exutorio (punto de análisis), para la comparación de medición de flujo. Cabe mencionar que la resolución del

<sup>4</sup> La ubicación del punto puede variar en píxeles y esto podrá modificar en ocasiones la delimitación de la zona, se recomienda realizar mínimo dos trazados más para verificar la delimitación.

MDE, siendo la base para la metodología antes mencionada, es función del correcto trazo de las cuencas a partir de los puntos de análisis.



**Figura 27:** Cuenca y subcuencas trazadas

### 2.5.2 Batimetría para el cauce en estudio

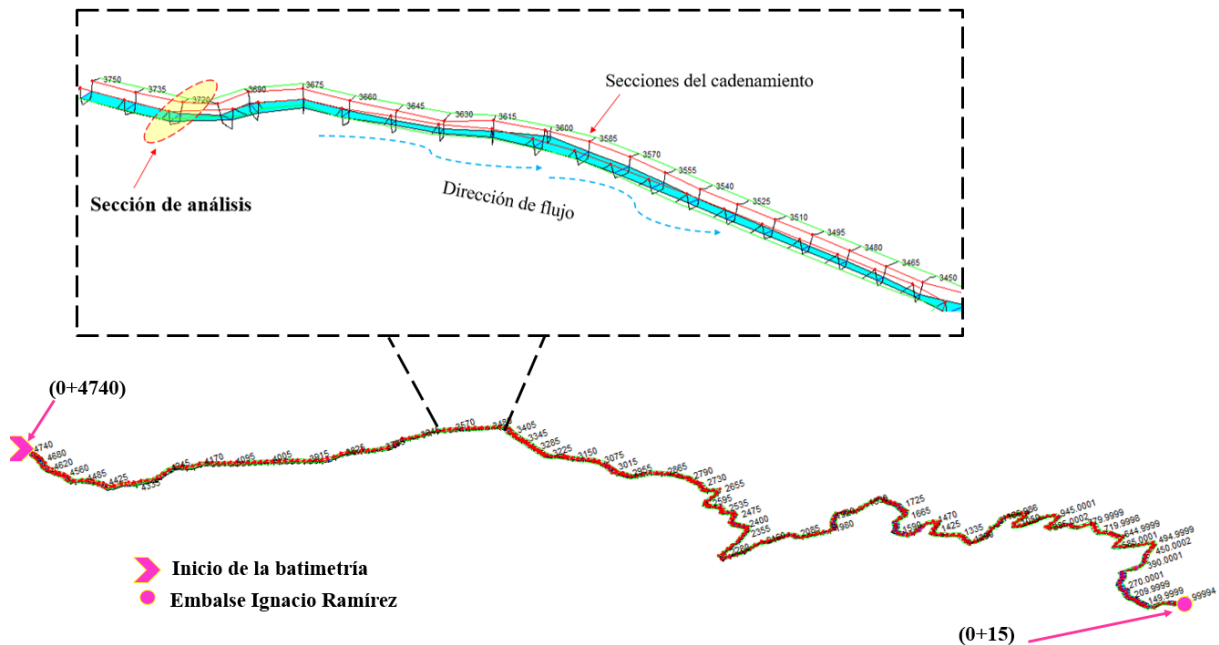
En topografía se entiende por batimetría el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, cuya finalidad es la obtención de coordenadas (X, Y, Z) de todos los puntos. La parte que caracteriza a los diversos métodos de levantamientos batimétricos es la determinación de la profundidad de un punto, la cual se obtiene midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie de fondo. En el levantamiento los puntos se organizan en perfiles, los cuales son un conjunto de puntos alineados en una determinada dirección. Los perfiles se sitúan de manera paralela entre ellos. En algunos casos se replantean puntos singulares (X, Y conocidas) para obtener la cota de los mismos (63).

Se realizó un levantamiento batimétrico con la finalidad de dar una visualización específica del cauce en estudio. El levantamiento tuvo una longitud de 5 km aguas arriba de la presa, teniendo una distancia entre cada perfil de 15 metros. Se consideraron cambios de amplitud y de dirección del cauce, obteniendo la plantilla correspondiente en formatos CAD (Computer-Aided Design) para la importación al software de modelación. En la **Figura 28** se observa la ubicación del cauce en análisis. Las coordenadas de inicio del levantamiento son  $-99,86^\circ$  de longitud y  $19,44^\circ$  de latitud, dicho punto fue elegido por la zona de influencia sobre la desembocadura de la presa “Ignacio Ramírez”. La amplitud y caudal de río observado en las visitas de campo previas.



**Figura 28:** Descripción general de la zona de estudio, estaciones hidrométricas y puntos de aforo.

La batimetría fue realizada con una estación total, la que da como resultados coordenadas georeferenciadas en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator). Con la ayuda de la herramienta de CivilCad se generó la triangulación correspondiente, para crear las secciones de coordenadas de altimetría y un modelo 3D del cauce del río. En la **Figura 29**, se observa la caracterización de secciones de batimetría y cadenamiento como lo describe el software Hec-Ras, así como la ubicación de sección de análisis.



**Figura 29:** Caracterización de la batimetría Hec-Ras.

### 2.5.3 Datos hidrométricos

Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal se genera por la precipitación pluvial y escurrimiento, así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales. También deben considerarse las descargas asociadas a los diversos usos del agua (drenajes sanitarios). (64).

En conjunto con los aforos realizados, se analizaron los datos de estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca, calculando caudales promedios mensuales para realizar la comparación en un mismo periodo de tiempo. Para la elección de las estaciones hidrométricas se apoyó de la información proporcionada por el BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, CONAGUA), el cual integra la red hidrométrica nacional y el SIATL, un simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, desarrollado para facilitar el estudio del comportamiento del recurso hídrico superficial en las cuencas de México, orientado a la simulación con métodos de redes geométricas y funciones para análisis hidrológico (65). Con esta información de acuerdo con la ubicación geográfica de la zona en análisis (**Figura 28**), se obtuvieron como resultados el nombre de ocho estaciones:

- 12790 Tres Barrancas
- 12574 Los Velázquez
- 12534 Atotonilco II
- 12578 Puente los Velázquez
- 12655 Atotonilco I
- 12727 Presa Ignacio Ramírez
- 12525 El Tule
- 12627 Pasarela Solís

Al revisar la ubicación respectiva de cada una de las estaciones de acuerdo con la información que se brinda en el catálogo del BANDAS, se descartaron seis de estas estaciones. Para el caso de las estaciones con 12627 y 12525 corresponden a ubicaciones en otros estados de la República, mientras que para las 12727 y 12790, se encontraban inactivas desde un periodo largo de tiempo sin especificar, y no se tenían registros de estas estaciones. La estación 12655 se descartó por la lejanía de los puntos de muestreo y esta no se encontraba dentro de la cuenca limitante. Por lo que se consideraron únicamente las estaciones 12578, 12534, y 12574. Esta última se descartó ya que no contaba con datos suficientes ni actualizados del sitio y se encuentra inactiva desde el año 2010.

Con la información anterior y auxiliándose del trazado de la cuenca descrito en la sección 2.5.1, se ratificaron las estaciones hidrométricas de la zona que fueron utilizadas, las cuales son: 12578 “Puente Los Velázquez” (99° 52’ 05” O - 19° 27’ 10” N) que es coincidente con la sección de aforo A, y a una distancia de 1.48 km de la sección B, y la estación 12534 “Atotonilco II” (99° 46’ 35” O - 19° 27’ 10” N). De acuerdo con el Atlas de la Cuenca Lerma-Santiago (10), esta última es la estación que registra los datos de caudal del río y se encuentra a una distancia de 10.1 km respecto a la sección A y 8.76 km de la sección B, las cuales cuentan con datos históricos del año 1963 al 2014 y 1965 al 2014, respectivamente, la ubicación se observa en la **Figura 28**.

La estación 12534 “Atotonilco II” se encuentra sobre el embalse de la presa, por lo que se tomó únicamente en cuenta como parámetro estadístico de comparación del caudal máximo. El análisis de los datos de la estación 12578 “Puente Los Velázquez” fue útil ya que se encuentra aguas arriba del embalse y es coincidente con uno de los puntos de muestreo, permitiendo una comparación directa con los aforos realizados. Ambas estaciones se encuentran a cargo de la CONAGUA, quien registra y procesa los datos.

En su página web oficial son de acceso público y se tiene disponibilidad a los datos históricos registrados en formato “.accdb” (Microsoft Office Access), con registros de:

- Gastos medios diarios (DD)
- Datos hidrométricos mensuales (DM)
- Datos hidrométricos anuales (DA)
- Gastos instantáneos
- Sedimentos
- Limnigrama
- Tirante (altura de agua medida a partir del fondo)

En este trabajo se tomaron en cuenta los gastos mínimos, medios y máximos diarios. Se generaron platillas de cálculo respecto a cada mes del año, así como el promedio anual. Inicialmente se depuró la información obtenida, ya que se encontraron alrededor de 24 datos total por las dos estaciones, con registro de caudales atípicos alrededor de 60 m<sup>3</sup>/s. Con la literatura investigada y en el mes de registro, resultaron irreales y no se consideraron para la estadística.

Una vez depurados y ordenados los datos históricos de las respectivas estaciones (alrededor de 14900 datos por estación), se analizaron los promedios por mes y por año, esto con la finalidad de establecer los meses lluviosos y de estiaje, así como los años con mayor índice de caudal registrado, generando así la estadística de comparación de caudal. Al realizar el respectivo análisis de la estación 12534 “Atotonilco II” se determinó que esta podría establecer un rango extra de caudales, ya que como se mencionó anteriormente, en esta se registra el total de los afluentes que alimentan a la presa por lo que los caudales reportados son mayores. Al establecer este rango de caudal se determinó que por ningún motivo alguno de los caudales medidos por los aforos o calculados por los métodos hidrometeorológicos, deberían superar a los registrados por dicha estación. Sin embargo, el parámetro principal para este trabajo, es la información proporcionada por la estación 12578 “Puente los Velázquez”.

#### 2.5.4 Métodos hidrometeorológicos

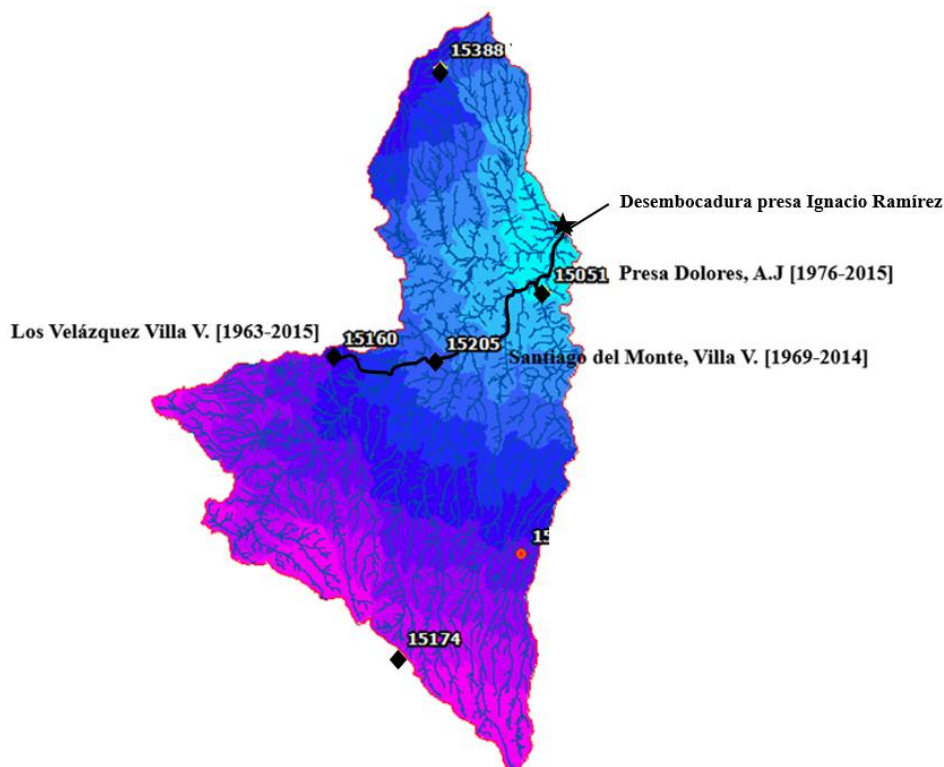
Para la obtención de resultados a partir de la aplicación de métodos hidrometeorológicos, se empleó la metodología pertinente en una serie de secciones individuales, tomando en cuenta criterios generales. Es importante aclarar que a partir del trazado original de la cuenca y después del análisis pertinente de las visitas de campo, así como el primer acercamiento con los métodos de cálculo, se determinó dividir la cuenca en dos subcuencas de menor tamaño, las que se muestran en la sección 2.5.1. Por lo tanto, lo descrito en las secciones 2.5.4.5 y 2.5.4.6 se realizó para la subcuenca de la sección A, y la subcuenca de la sección B, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20 y 50 años para cada mes del año.

##### 2.5.4.1 Selección de estaciones climatológicas.

Para la selección de las estaciones climatológicas se auxilió del trazado de la cuenca descrito en la sección 2.5.1, tomando en cuenta aquellas aisladas dentro de la misma. Esto en base a la herramienta del SIG, que permitió importar la ubicación geográfica de cada una de ellas para identificarlas dentro de la zona geográfica delimitada. Estas se muestran en la **Figura 30** con nombres y códigos de estación. Se determinó este método de selección ya que usualmente en estos casos se aplica el método de polígonos de Thiessen, el cual se basa en ponderar el valor de la variable climática en cada estación en función de un área de influencia. El procedimiento asume que en el área de influencia, ocurre el mismo valor de lluvia



de aquel observado en la estación meteorológica más cercana. Sin embargo, se tiene la desventaja de que estos proporcionan una distribución discontinua de la lluvia sobre la cuenca y de considerar una distribución homogénea dentro de cada polígono (66).



**Figura 30:** Nombre y ubicación espacial de estaciones climatológicas

Las estaciones seleccionadas son 15160 “Los Velázquez” la cual se encuentra en la misma ubicación que la estación hidrométrica “Puente los Velázquez”; 15205 “Santiago del monte” y 15051 “Presa dolores”. Se observan dos estaciones más, 15174 y 15388. Para el caso de la primera no se tomó en análisis, ya que se localiza en los límites de la cuenca y alejada de la zona específica de estudio, mientras que la segunda se encuentra desactivada desde el año 2006.

#### 2.5.4.2 Análisis y depuración de datos.

Para el análisis y depuración de datos, estos se ordenaron por mes y año. Se tomó en cuenta la precipitación diaria, observando el intervalo de valores y tomando en cuenta lo descrito en la literatura. De acuerdo con el observatorio hidrológico la clasificación se observa en la **Figura 31**, la lluvia registrada en la zona de estudio va de ligera a fuerte por lo que los valores de intensidad muy fuerte se consideró arriba del 120 mm/h, fueron descartados. Al analizar las tres estaciones se depuraron un total de 36 datos.



**Figura 31:** Clasificación de intensidad de lluvia (67).

Los datos ordenados y jerarquizados permitieron ratificar las temporadas de estiaje y avenidas a lo largo del año, así como identificar los años más lluviosos y obtener un aproximado de incidencia de lluvia en el rango registrado como máximo. Esto también se realizó con la finalidad de obtener una base de datos sólida para la manipulación de los mismos con el software de estadística (HIDESTAD 3.0) y obtener el comportamiento general de lluvia.

#### 2.5.4.3 Aplicación de funciones estadísticas

Con los datos de precipitaciones obtenidas de las estaciones meteorológicas, se realizó el análisis estadístico, ajustando los valores promedios máximos de precipitación en 24 h, con la aplicación de funciones de distribución de probabilidad. Desde el punto de vista matemático, si una función tiene más parámetros, es más flexible para ajustar a una distribución empírica (68). Se tomaron en cuenta las distribuciones Normal (Gauss), Gumbell, y Log-Normal, descritas en la **Tabla 6** donde se muestran aquellas funciones de probabilidad utilizadas en eventos de precipitación.

**Tabla 6:** Funciones de distribución de probabilidad utilizadas en eventos de precipitación (68).

Tipo de Distribución	Uso	Observaciones
<b>Binominal</b>	Variable Discreta	Eventos
<b>Poisson</b>	Variable Discreta	Si la probabilidad es pequeña y el número de eventos N, grande Frecuencia de caudales y lluvias. Generación de hidromas sintéticos
<b>Gamma de 2 parámetros</b>	Variable Continua	
<b>Weibull</b>	Existe un límite superior	Valores mínimos de caudales o lluvias
<b>Normal (Gauss)</b>	Variable Continua	Records extensos de lluvia y caudales medios de largos intervalos (1 año, 2 años, 5 años, 10 años)
<b>Gumbel</b>	Valores Extremos	Valores extremos
<b>Log-Normal (Galton)</b>	Variable continua	Precipitación, caudales anuales. Series de duración parcial
<b>Exponencial</b>	Semilogaritmica	Series de duración parcial

La aplicación de las funciones y el ajuste de precipitación se realizaron con el software HIDESTAD 3.0 desarrollado en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Este permite realizar un análisis de frecuencia para las diferentes distribuciones de probabilidad, tanto funciones clásicas (Normal, log-



normal, Pearson, Gamma) como de orden superior (Beta-Jacobi, Wakeby, etc), y realizar comparaciones entre ellas, graficando los resultados en diferentes papeles de probabilidad (Normal. Log-Normal y Gumbel) (69).

Para identificar la función de probabilidad que se ajustó de mejor manera a los datos, para la posterior obtención de las curvas IDF o IDT (Intensidad, Duración y Frecuencia), se realizó el cálculo del error cuadrático medio (RMSE) Ec. 2-1, el cual compara un conjunto de valores, respecto a su media y desviación estándar.

**Ec. 2-1:** Error cuadrático medio:

$$C = [\sum(x_e - x_0)^2]^{1/2}$$

Donde:  $x_e$ , – variable aleatoria de precipitación [mm/h]  
 $x_0$  – valor estimado de la distribución [mm/h].

Para determinar cada uno de los valores anteriormente descritos en la ecuación se calcularon dependiendo de cada tipo de distribuciones descritas a continuación:

- Normal

**Ec. 2-2:** Variable estandarizada distribución normal:

$$z = (x_0 - \mu) / \sigma$$

Donde:  $x_0$  – valor estimado de la distribución [mm/h]  
 $\mu$  – Media  
 $\sigma$  – desviación estándar.

**Ec. 2-3:** Variable aleatoria de precipitación distribución Normal:

$$x_e = z - \sigma + \mu$$

Donde:  $z$  – variable estandarizada,  
 $\sigma$  – desviación estándar  
 $\mu$  – Media.

- Log-Normal

**Ec. 2-4:** Media de logaritmos de la variable aleatoria, distribución Log-Normal

$$\alpha = \sum[(\ln x_0) / n]$$

Donde:  $x_0$  – es el valor estimado de la distribución [mm/h]  
 $n$  – Tamaño de la muestra.

**Ec. 2-5:** Desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, distribución Log-Normal.

$$\beta = [\sum(\ln x_0 - \alpha)^2 / n]^{1/2}$$

Donde:  $x_0$  – es el valor estimado de la distribución [mm/h]  
 $\alpha$  – es la media de los logaritmos de la variable aleatoria  
 $n$  – Tamaño de la muestra.

**Ec. 2-6:** Variable aleatoria distribución, Log-Normal

$$x_e = e^{z\beta + \alpha}$$

Donde:  $\beta$  – es la Desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria  
 $\alpha$  – es la media de los logaritmos de la variable aleatoria  
 $z$  – es la variable estandarizada.

- Gumbell

**Ec. 2-7:** Variable aleatoria, distribución Gumbell

$$x_e = \beta - \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln\left[\frac{Tr}{Tr - 1}\right]$$

Donde:  $\beta$  – es la Desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria  
 $\alpha$  – es la media de los logaritmos de la variable aleatoria  
 $Tr$  – es el periodo de retorno.

Dicho proceso y aplicación de métodos estadísticos se realizó a cada una de las tres estaciones seleccionadas, mostrando así que todas representan el comportamiento de precipitación de la cuenca. Esto se puede apreciar en el apartado 3.1.3 en la **Figura 50** y con ello se observó que la función Gumbell, seguida de la Log-Normal, mostraban un mejor ajuste a los datos. Sin embargo, la primera manifestaba un mejor ajuste en los meses lluviosos (Junio, Julio, Agosto y Septiembre), por lo que se fue utilizada para obtener los respectivos resultados. En la **Figura 32** se muestran los porcentajes calculados de RMSE para cada una de las funciones y para cada estación.

Error cuadrático Medio			
Estación Puente los Velázquez			
Mes	Normal	Log-Normal	Gumbell
Enero	2.01	4.27	20.87
Febrero	1.24	3.19	26.76
Marzo	1.60	9.97	6.28
Abril	5.70	19.54	6.29
Mayo	10.48	3.42	5.04
Junio	13.42	55.88	5.76
Julio	9.47	23.96	5.41
Agosto	12.13	21.17	5.57
Septiembre	21.88	18.22	5.31
Octubre	8.26	5.66	5.49
Noviembre	1.23	3.13	25.03
Diciembre	1.66	3.86	25.03

a)

Error cuadrático Medio			
Estación presa Dolores			
Mes	Normal	Log-Normal	Gumbell
Enero	s/d	s/d	s/d
Febrero	s/d	s/d	s/d
Marzo	2.81	s/d	s/d
Abril	10.51	72.11	5.77
Mayo	15.22	9.99	5.16
Junio	14.81	89.44	6.00
Julio	27.63	73.44	6.99
Agosto	8.04	26.65	5.08
Septiembre	14.40	53.92	6.89
Octubre	14.63	11.44	4.56
Noviembre	3.56	s/d	s/d
Diciembre	s/d	s/d	s/d

b)

Error cuadrático Medio			
Estación Monte Santiago			
Mes	Normal	Log-Normal	Gumbell
Enero	7.46	5.16	16.84
Febrero	5.69	3.71	21.11
Marzo	2.08	13.41	5.78
Abril	5.29	21.20	5.90
Mayo	11.04	3.94	4.79
Junio	13.42	63.43	5.82
Julio	10.70	28.07	5.49
Agosto	9.40	20.81	5.23
Septiembre	21.18	21.21	5.37
Octubre	7.90	6.35	5.02
Noviembre	1.51	2.91	33.87
Diciembre	1.28	4.72	36.39

c)

**Figura 32:** Errores cuadráticos medios entre funciones, para cada estación

#### 2.5.4.4 Curvas IDF (Método de Chen)

Para obtener los datos de intensidad de lluvia se aplicó el método de Chen, quien realizó estudios sobre las precipitaciones para diferentes períodos, con lo cual se obtuvo una ecuación generalizada de intensidad-duración-período de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 min a 24 h (**Ec. 2-8**). Los valores a, b y c son parámetros de tormenta que pueden variar según el factor R, el cual es la relación de la lámina de precipitación a 1 y 24 horas asociadas a un mismo periodo de retorno  $Tr$  (70).

**Ec. 2-8:** Precipitación en un tiempo, Método de Chen

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60}\right)$$

Donde:  $P_t$  – precipitación en un tiempo [mm]  
 $Tr$  – periodo de retorno [año]  
 $F$  – cociente de relación lluvia frecuencia  
 $a, b, c$  – parámetros de tormenta  
 $t$  – tiempo de duración [min]  
 $R$  y  $P_1^{10}$  – factores dados por las ecuaciones **Ec. 2-9** y **Ec. 2-10**, respectivamente.

**Ec. 2-9: Cociente de duración de lluvia**

$$R = \frac{P_t^{Tr}}{P_{24}^{Tr}}$$

Donde: R – cociente de duración de lluvia

$P_t^{Tr}$  – altura de lluvia para una duración t y asociada a un periodo de retorno [mm]

$P_{24}^{Tr}$  – altura de lluvia para una duración de t= 24 min y un asociada a un Tr,

**Ec. 2-10: Cociente de relación de lluvia frecuencia**

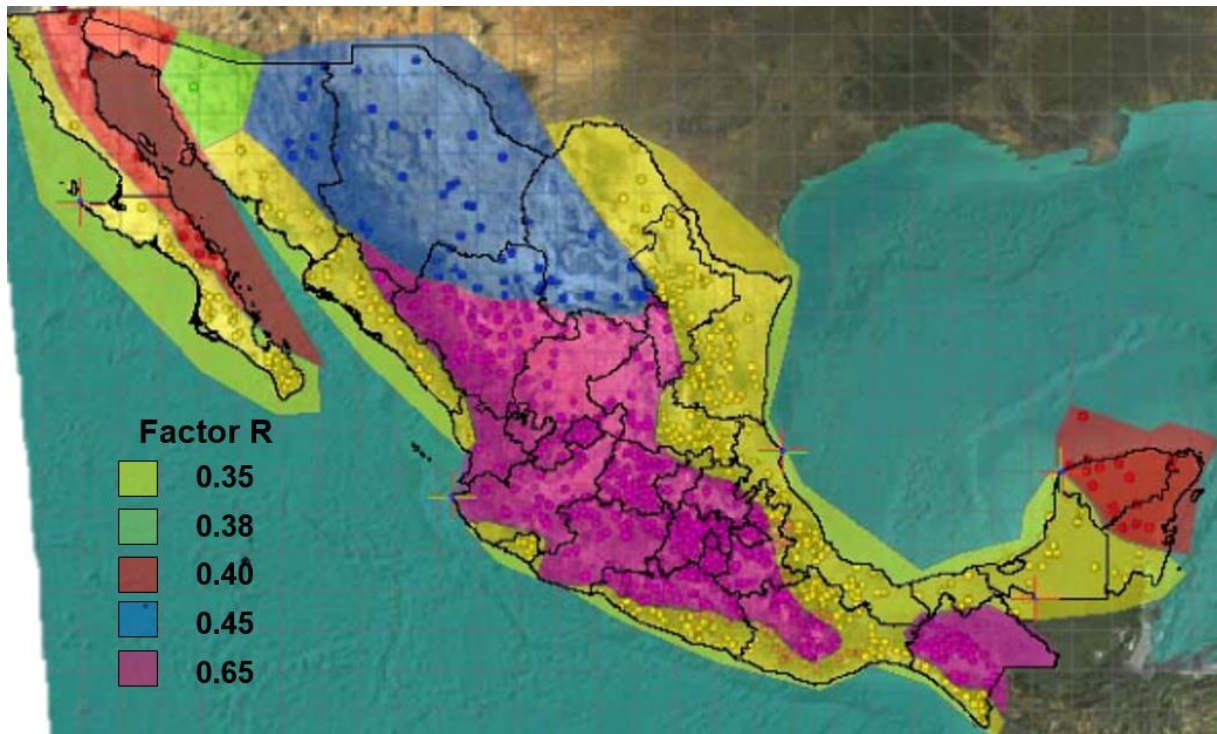
$$F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}}$$

Donde: F – cociente relación lluvia frecuencia

$P_{24}^{100}$  – altura de lluvia asociada a un t=24 min y un Tr de 100 años

$P_{24}^{10}$  – Altura de lluvia asociada a un t=24 min y un Tr de 10 años

Los datos de altura de lluvia, se obtuvieron con lo procesado por el software HIDESTAD 3.0 de acuerdo con lo descrito en la sección 2.5.4.3 para la función Gumbell. Para el caso de estudio y de acuerdo con la escasa información disponible del comportamiento temporal de las precipitaciones, se tomaron en cuenta los estudios realizados por Baeza 2007 (71), que permitieron asignar valores del coeficiente R (factor de conectividad-Cociente de duración de lluvia), dando como resultado que  $R= 0.65$ , de acuerdo con la ubicación de la zona de estudio (**Figura 33**).



**Figura 33:** Valores del factor R por región, (71).

### 2.5.4.5 Método racional

Se tomó en cuenta la aplicación del método racional, ya que de acuerdo con lo recomendado en el manual de aforos de CONAGUA, 1992, (23), permite la estimación sencilla de caudales con una menor cantidad de parámetros, permitiendo aproximaciones generales. El método racional se describe a continuación.

El gasto máximo (**Ec. 2-11**) posible que puede producirse con lluvia de intensidad  $I$ , obtenida a partir del método de Chen para el método racional, en una cuenca de área  $A_c$  y coeficiente de escurrimiento  $C_e$ , que expresa la fracción de lluvia que escurre en forma directa (33).

**Ec. 2-11:** Gasto pico, Método Racional

$$Q_p = \frac{C_e I A_c}{360}$$

Dónde:  $Q_p$  – gasto máximo [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $C_e$  – coeficiente de escurrimiento  
 $I$  – intensidad [ $\text{mm}/\text{h}$ ]  
 $A_c$  – área de cuenca [ $\text{m}^2$ ]

Donde el coeficiente de escurrimiento es la cantidad de agua que escurre en forma laminar en la superficie restando la infiltración y evapotranspiración. El escurrimiento superficial se produce por el volumen de la lluvia que no intervino en los procesos de evaporación, infiltración o almacenaje superficial, sino que, escurrió por gravedad sobre la superficie del suelo y por la red de drenaje (72). El coeficiente de escurrimiento se obtuvo a partir de un valor ponderado mostrado en la **Ec. 2-12**

**Ec. 2-12:** Coeficiente de escurrimiento promedio

$$c_e = \frac{A_1 c_1 + A_2 c_2 + \dots A_n c_n}{A_c}$$

Dónde:  $C_n$  – coeficiente de escurrimiento correspondiente  
 $A_n$ , Área correspondiente [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_c$  – área total de cuenca [ $\text{m}^2$ ]

Los valores se obtuvieron con la ayuda de ArcGIS de las áreas correspondientes. Los valores utilizados y obtenidos se muestran en la **Tabla 7**, dando como resultado  $c_e=0.196$ .

**Tabla 7:** Datos de tipo de suelo y coeficientes de escurrimiento

Tipo de suelo	$C_e$	Áreas [ $\text{m}^2$ ]
Bosque de pino	0.1	5560000
Bosque de coníferas	0.1	6280000
Bosque de encino	0.1	850000
Manejo Agrícola	0.2	197150000
		$A_c= 210910000$

Para determinar el tiempo de comparación aproximada de los resultados de caudal, se calculó el tiempo de concentración, el cual es el tiempo mínimo para que los puntos de esorrentía de una cuenca aporten agua de forma simultánea. Esto es el tiempo que tarda la primer gota de lluvia en escurrir desde el punto más alto de cuenca hasta el punto más bajo. Para este caso se calculó a partir de parámetros morfométricos aplicando el método de Kirpich dado por la **Ec. 2-13**.

**Ec. 2-13: Tiempo de concentración método de Kirpich**

$$T = 0.02L^{0.77}S^{-0.385}$$

Dónde: L – longitud de la red hídrica [m]  
S – pendiente media del lecho [m/m]

Lo anterior permitió obtener un resultado aproximado del tiempo de concentración a 234.56 minutos, en dicho tiempo, teóricamente el caudal se estabiliza y se tiene una aportación uniforme.

**2.5.4.6 Método SCS-HMS**

Se prosiguió con la aplicación de un modelo hidrológico que es el HEC-HMS, basado en el SCS. Método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), o también llamado del número de curva (CN) donde la altura de lluvia efectiva es función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado número de curva CN. El número de curva varía en el intervalo de 0 a 100 y depende de factores que influyen en la generación de escorrentía en la cuenca: tipo hidrológico del suelo (grupo hidrológico-capacidad de drenaje), uso y manejo del terreno, condición superficial del suelo y condición de humedad antecedente (34).

Para la aplicación de este método se utilizó el software HEC-RAS. Para ello fue necesario realizar el cálculo del tiempo de retraso (Lag) y retención potencial de la cuenca dado por **Ec. 2-14** y **Ec. 2-15** respectivamente, parámetros que son requeridos para el modelo.

**Ec. 2-14: Tiempo de retraso de la cuenca**

$$Lag = \frac{L^{0.8}(S_p + 1)^{0.7}}{1900S}$$

Dónde:  $S_p$  – retención potencial  
S – pendiente de escurrimiento  
L – longitud de escurrimiento [ft]

**Ec. 2-15: Retención potencial**

$$S_p = 25.4 \left[ \frac{1000}{CN} - 10 \right]$$

Dónde:  $S_p$  – Retención potencial  
CN – número de curva

Para el caso de estudio, de acuerdo con las características de suelo y los valores otorgados, tiene un CN aproximado de 88, correspondiente a arenas muy finas, limos sueltos con alto contenido de arcilla propios de cultivos de cosecha agrícola sin tratamientos de conservación (73).

Dichos parámetros calculados son condiciones iniciales del modelo, los cuales dependen de las características de la cuenca. Esto se realizó para las dos subcuencas obtenidas mostradas en la **Figura 27**. De esta forma se analizó el comportamiento del caudal de acuerdo al escurrimiento característico de cada una.

Para los datos de precipitación, se tomaron en cuenta intervalos de tiempo de 15 minutos, durante siete días. En la obtención del hidrograma que alimenta el modelo, se obtuvieron cada una de las ecuaciones de forma potencial de las curvas IDF mostradas en el **Anexo 2**. Estas curvas otorgan el comportamiento de lluvia en un intervalo de tiempo definido, lo cual dio como resultado la precipitación efectiva en un intervalo de tiempo en minutos, para un mes, en determinado periodo de retorno.



### 2.5.5 Obtención de caudales con aforos en sitio

Como etapa inicial del trabajo de investigación se realizaron visitas previas en la zona de estudio con la finalidad de identificar el tramo y los puntos del río para el análisis; distinguiendo tres secciones de control (Ver **Figura 28**). Se llevaron a cabo aforos mensuales, en los meses representativos de las estaciones meteorológicas (Febrero, Marzo, Junio, y Octubre) principalmente. Se elaboraron algunos otros en los meses de: Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre, con la finalidad de obtener mayor cantidad de datos para alimentar posteriormente al software de modelado.

Para la selección de secciones de aforo, se tomaron en cuenta criterios empíricos recomendados en distintos manuales de aforos. Los criterios tomados en cuenta son:

- Verificar si existe una estación hidrométrica cercana esto con la finalidad de comparar los resultados.
- No debe existir en la sección cambios abruptos en la dirección de flujo.
- Encontrarse alejado de obras de toma y perturbaciones de flujo, como rocas grandes.
- Que en la sección no exista flora y fauna que pueda perturbar las mediciones.
- Que la sección contenga características representativas del río en estudio.
- Tomar las mediciones después de zonas de descarga o unión de afluentes, donde el flujo se observa más uniforme.

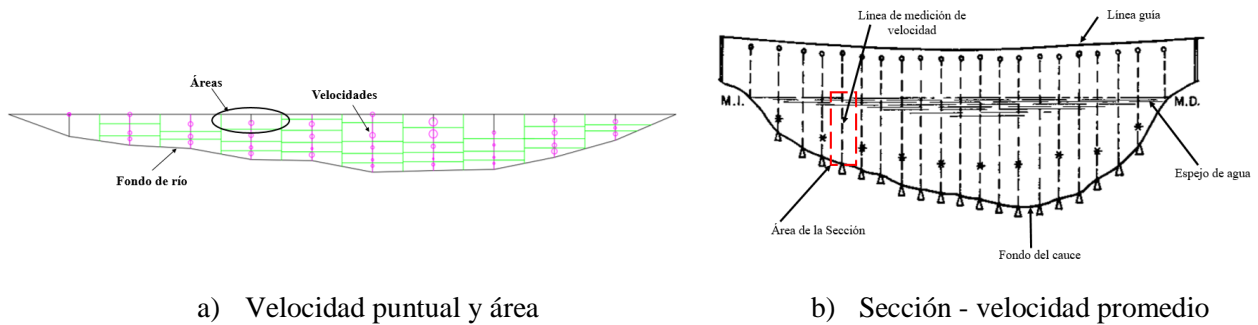
Para obtener el caudal de las secciones, se empleó el método sección-velocidad (23) siendo el más utilizado para aforos y es uno de los más exactos recomendado por CONAGUA, para cauces naturales con caudales medios y bajos.

En la toma de datos de campo, se utilizó un molinete y equipo topográfico para la obtención de la batimetría. Esto se realizó colocando una cuerda de extremo a extremo del punto, graduada cada 50 cm para los puntos de medición de velocidades. Las mediciones de velocidad se realizaron con el molinete cada cinco centímetros en la vertical. (**Figura 34** y **Anexo 3**).



**Figura 34:** Aforo en la sección hidráulica, (fotografía tomada el 07/02/18)

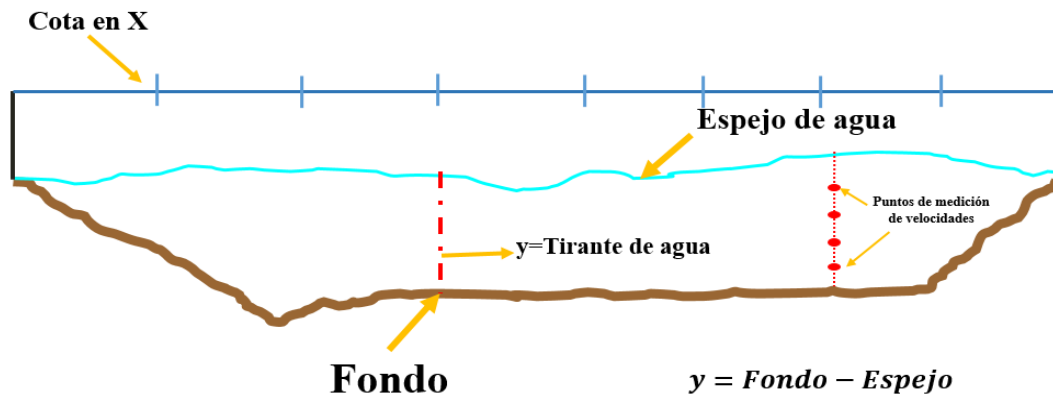
Los resultados obtenidos se procesaron en el software AutoCAD 2016, para determinar las áreas de las secciones correspondientes. El método de sección velocidad puede ser llevado a cabo de dos formas, una obteniendo las áreas puntuales con respecto a cada velocidad como se muestra en la **Figura 35 a**, multiplicando el área obtenida por su velocidad y sumando los caudales obtenidos en cada pequeña subsección, este método lo llaman coloquialmente “caudal promedio”. Otra manera es obtener el área, es por secciones verticales multiplicadas por su velocidad promedio en la sección (**Figura 35 b**).



**Figura 35:** *Calculo de caudal sección-velocidad*

Con los datos obtenidos en el primer aforo, se aplicaron las dos formas del método, con la finalidad de comparar resultados. Se determinó que el método de sección – velocidad promedio resulta más exacta, ya que a diferencia de caudal promedio no es necesario tener las velocidades puntuales en el área y tirante específico. En campo resulta complicado la inferencia del mismo, aunado a que se pueden encontrar obstáculos para tomar los datos como plantas acuáticas o zonas rocosas. Con el método de sección – velocidad promedio, se infiere la velocidad total de la sección con el cálculo promedio de esta y el error de estimación de caudal es menor.

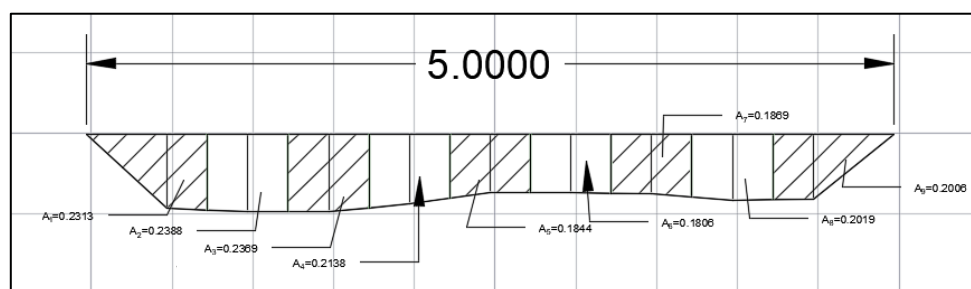
Para el procesamiento de datos, se ordenaron en tablas para verificarlos y analizarlos. Se trazó el perfil de la sección donde las cotas en el eje X se consideraron cada 50 cm por lo que el ancho total de la sección era el número de puntos de medición por dicha cota. Las mediciones de velocidad con respecto a la profundidad se tomaron cada 5 cm, por lo que el número de mediciones de velocidad dependían del tirante. Para determinar el tirante una vez realizadas las mediciones, se obtuvo con la resta de las cotas medidas por el equipo topográfico entre fondo y espejo (**Figura 36**)



**Figura 36:** *Características del perfil de río*



Después de trazar el perfil del río se trazaron los polígonos para calcular las áreas correspondientes respecto a cada subsección (**Figura 37**). Para posteriormente la información se procesó en una hoja de cálculo donde se multiplicó el área obtenida por la velocidad promedio en la sección correspondiente y así obtener el caudal total de la sección.



**Figura 37:** Áreas de sección

Con los aforos en sitio, es importante mencionar que durante los meses de abril y mayo se inunda la sección B ubicada en la delegación Benito Juárez. La delegación realiza un cierre de las compuertas de la presa para subir el nivel del agua en el río hasta llegar a un desbordamiento a las parcelas adyacentes al río. Este método proporciona el recurso hídrico para riego de pastoreo en temporal. Al cerrar las compuertas de la presa el flujo en el río ni tiene salida generando un remanso de agua aguas arriba del cauce. Esta actividad es un factor de análisis determinante para la propuesta del aprovechamiento hidroeléctrico.

## 2.6 MODELACIÓN NUMÉRICA DEL RÍO

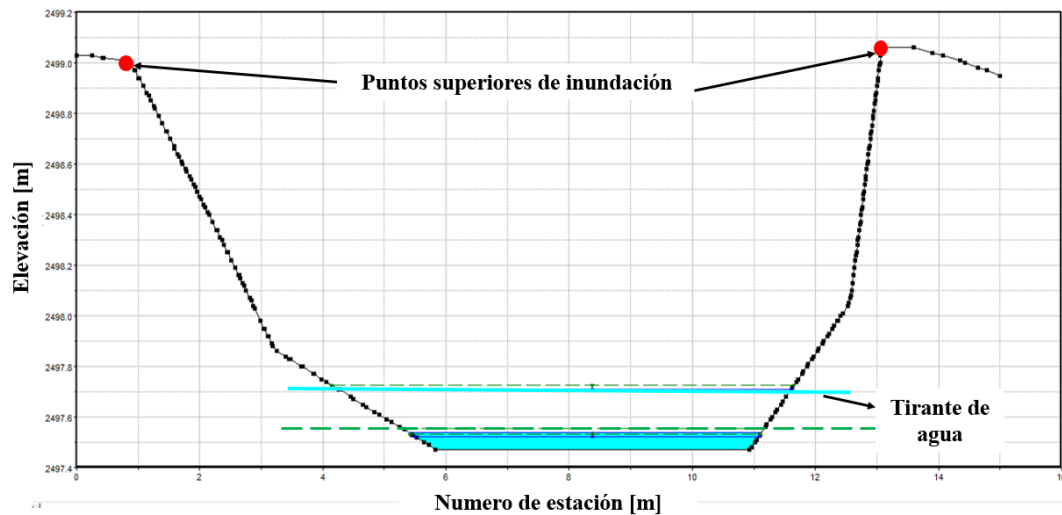
Mediante HEC-RAS se realizaron distintos escenarios de funcionamiento hidráulico del río. Los datos de entrada en cada escenario fueron los caudales, mínimos, medios y máximos obtenidos de las estaciones hidrométricas, así como los caudales resultantes de la aplicación del método SCS-HMS. Este último método sobreestima el caudal, permitiendo establecer un rango de viabilidad del aprovechamiento hídrico, así como observar los meses de avenidas máximas en caudales medios.

Con los resultados de velocidad y tirante de agua entre otros parámetros analizados y obtenidos mediante la modelación, se eligió la zona y el tramo óptimo para la posible aplicación del aprovechamiento energético. Con base en los resultados específicos de la zona se construyeron las curvas de energía específica versus caudal, potencia versus caudal, entre otras. Esto para cada periodo de retorno (Probabilidad de ocurrencia de un evento hidrológico) y para cada rango de caudal establecido por las estaciones hidrométricas. Esto permitió obtener de manera general un indicio del potencial de generación del río, para aplicaciones energéticas.

- HEC-RAS

Para obtener la variación espacio temporal del caudal, se realizó la modelación mediante la herramienta computacional HEC-RAS. Se tomó en cuenta una plantilla geométrica realizada a partir de un estudio de batimetría del río con una longitud total de 4.7 km, con ello obtener los parámetros necesarios que alimentan al software. Se ajustaron los hombros de la sección, es decir se colocaron los puntos máximos (puntos superiores de desborde o inundación) para delimitar el área mojada, analizando cada sección de los 4.7 km de longitud del cauce del río. En la **Figura 38** se muestra un ejemplo de sección transversal de

río, donde los puntos marcados de color rojo son aquellos donde deben estar ubicados los hombros. Algunos de estos puntos no se encontraban en la ubicación correcta. Esto es importante ya que son los que delimitan la zona de desborde del río durante la simulación y si estos se encuentran en puntos más bajos a los correspondientes, resulta un área de estancamiento.



**Figura 38:** Elementos de sección de río

La selección del parámetro relacionado con la rugosidad del río significa estimar la resistencia al flujo en un canal. El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) es muy variable y depende de un gran número de factores cuyo conocimiento es de gran utilidad para las condiciones de diseño. Se modificó el coeficiente de Manning realizando un ponderado del mismo, que oscilaba entre 0.03 y 0.04 para fondo con grava, boleó y limpio, sinuoso en algunas secciones, dando como resultado un coeficiente de aproximadamente 0.0365, esto de acuerdo con la literatura recomendada (74). Resultado de la batimetría del río, la pendiente nominal del lecho fue de aproximadamente 1.2%. La pendiente entre cada sección es variable de acuerdo con la topografía del terreno y propiamente del río. Se prosiguió a establecer en el software los caudales promedios mensuales de las estaciones hidrométricas y los caudales obtenidos a partir del método SCS.

Es importante aclarar que la modelación con dicho software se realizó bajo condiciones de flujo subcrítico para obtener modulaciones con tirantes acercados a los posibles presentados en los periodos de retorno, de acuerdo al comportamiento de canales abiertos.

Con los resultados obtenidos de la primera aproximación del modelado, se determinó la sección óptima de aprovechamiento ubicada a 3720 m aguas arriba de la presa. Se realizó el ajuste del modelo modificando de manera iterativa el coeficiente de Manning en un tramo de 315 m, donde se incluía la sección previamente analizada, dando como resultado un coeficiente  $n = 0.06$ , equivalente a pocos arbustos en el fondo (74).

Con los resultados de la modelación, se realizaron curvas de energía específica y potencia de generación para los gastos máximos, medios y mínimos. Para los caudales promedio mensuales en los periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20 y 50 años, se calcularon los mismos valores variando el tiempo de escurrimiento. Para ello se tomaron en cuenta dos secciones: “Los Velázquez” (Sección A, **Figura 27**) y “Benito Juárez” (Sección B, **Figura 27**).

Para el cálculo de la energía específica (**Ec. 2-16**) se asume una velocidad uniforme a lo largo de la sección transversal en estudio. Con ello se tiene una cuantificación de la variación de energía específica respecto a

la profundidad del flujo, que corresponde a la suma de la carga de presión y a la carga dinámica del fluido en la sección de flujo (75).

**Ec. 2-16: Energía específica**

$$E_s = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2}$$

Dónde: y – tirante [m]  
 Q – caudal [m<sup>3</sup>/s]  
 g – aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]  
 A – área húmeda [m<sup>2</sup>].

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos con la aplicación de métodos de cálculo teórico de caudales, con unidades de potencia, se aplicó la **Ec. 2-17**.

**Ec. 2-17: Potencia**

$$W = (E_s Q \rho g) / 1000$$

Dónde: E<sub>s</sub> – Energía específica [m]  
 Q – caudal [m<sup>3</sup>/s]  
 ρ – Densidad del agua (999.1) [kg/ m<sup>3</sup>]  
 g – aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

## 2.7 DISEÑO DE OBRA DE TOMA

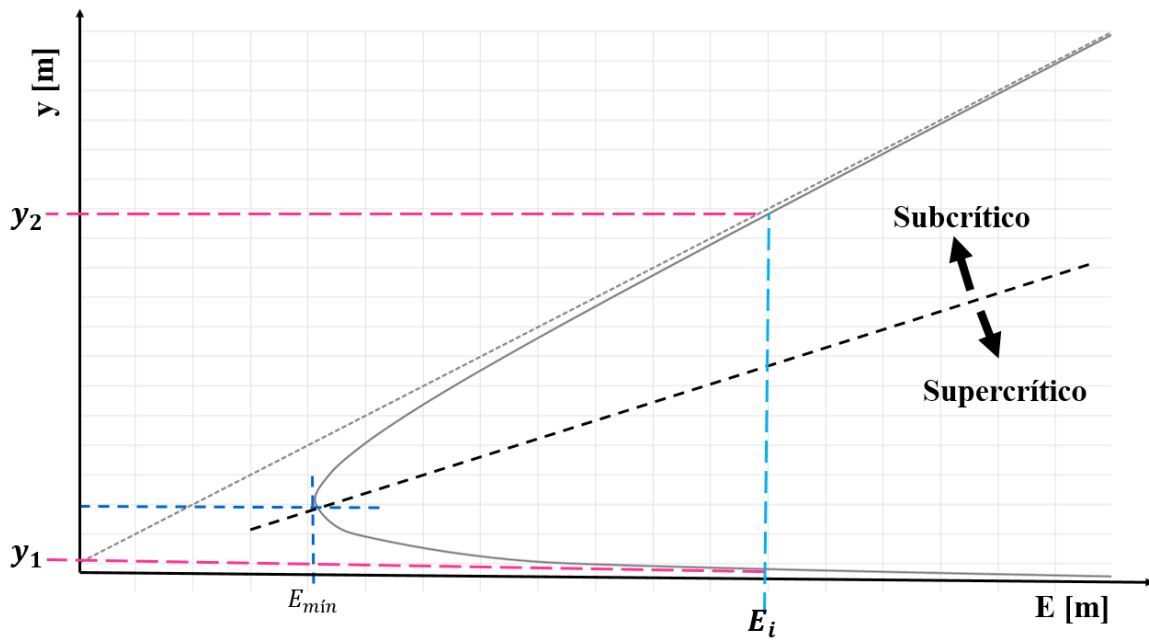
Para el dimensionamiento de una obra de toma es importante tomar varios criterios en cuenta para la aplicabilidad y funcionamiento óptimo de la misma, así como características de construcción y el objetivo final de la obra. En el diseño se realizó el análisis para determinar el ancho de una geometría rectangular, para el canal de aprovechamiento, así como el dimensionamiento del canal alterno para temporadas de avenidas y el caudal ecológico. Esto último para garantizar la generación continua y el control de carga del posible aprovechamiento hidráulico. El diseño se analizó bajo condiciones de flujo uniforme y flujo crítico. Esto para garantizar el funcionamiento hidráulico en ambos canales, sometidos a distintos escenarios de caudal y tirante, en temporadas de avenidas máximas y caudales medios.

Permitiendo de esta forma, construir una curva de energía en flujo uniforme del comportamiento del caudal en el canal de generación a lo largo del año, de acuerdo con los caudales medios de las estaciones hidrométricas y de los caudales ecológicos calculados, este último cálculo de caudal, se realizó con la finalidad de otorgar viabilidad energética ambiental a la obra. El dimensionamiento bajo un régimen de flujo uniforme permitió un comportamiento principal de soporte del canal para caudales ecológicos, el cual funcionara para enviar el caudal restante que supere el 1.6 m de tirante en el canal de generación. El diseño a flujo crítico permitió generar los gráficos de comportamiento de tirante y caudal, así como poner a prueba el soporte de caudal en las secciones diseñadas.

### 2.7.1 Dimensionamiento a flujo Crítico

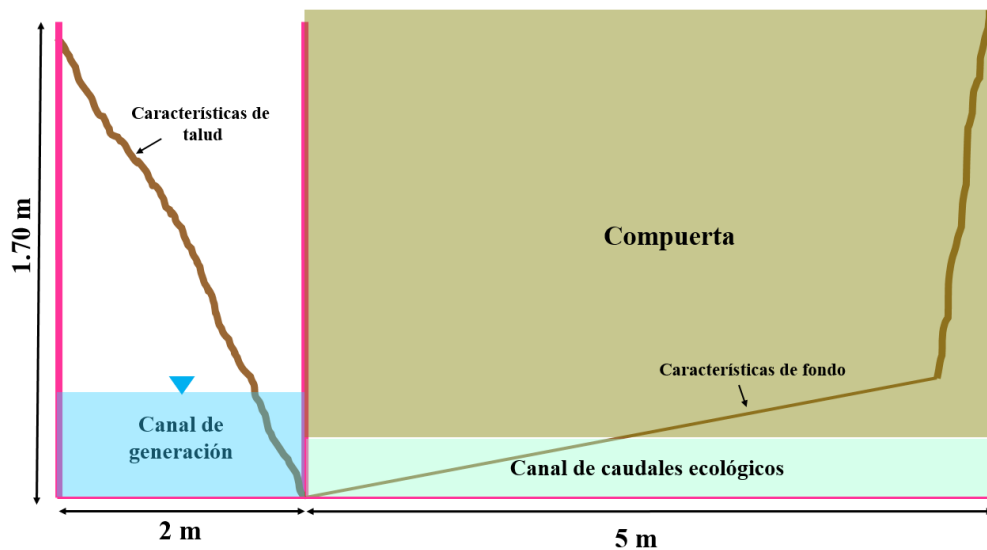
Las ecuaciones de energía y continuidad, permiten resolver los problemas de flujo a superficie libre en que se conoce el tirante de dos secciones extremas de un tramo corto al que se aplican y se requiere determinar el caudal. Si el gasto es conocido puede fluir a través de una sección de un canal con dos posibles tirantes,

característicos de dos tipos diferentes de régimen y la misma energía específica; es decir, que alguno de los dos regímenes pueden ocurrir para cada valor de la energía específica (**Figura 39**) (74).



**Figura 39:** Curva de energía específica en función del tirante

Dada las características de la sección mostrada en la **Figura 40**, se identificaron parámetros de tirante y ancho máximo permisible para el canal, con la finalidad de minimizar gastos de construcción y efectos ambientales de perturbación al medio, así como la visualización parcial de la obra de toma con respecto a la sección.



**Figura 40:** Características de sección para la para el aprovechamiento hidroeléctrico

Se planteó el diseño de un canal rectangular para la sección de aprovechamiento hidráulico, ya que, por las características del mismo, permite la facilidad de construcción y el análisis en generación hidroeléctrica.

Como primera aproximación de modo iterativo con la asignación de tirantes  $0.05 \leq y \leq 1.60$  m dejando un bordo libre de 0.11 m y anchos  $1 \leq b \leq 5$  m sobre la ecuación de energía específica (**Ec. 2-16**), se realizó una aproximación al ancho óptimo del canal de generación.

Se observaron los anchos propuestos que tuvieron una energía mayor con los tirantes dados. El ancho con un comportamiento congruente a la energía calculada se encuentra entre  $1 \leq E \leq 2$  m, por lo que tomando en cuenta las características de sección, el talud de lado izquierdo de la sección cuenta con una longitud equivalente a 2.08 m (**Figura 40**). Este permite hacer una excavación menor y lograr la construcción de una geometría rectangular al canal, mientras que el resto del cauce tendrá la forma geométrica actual. Esto permitirá una fácil construcción y beneficiará el drenaje de los caudales ecológicos. El segundo canal calculado del resto de sección, permitirá, de igual forma, conducir el caudal de temporada de avenidas para respetar el tirante máximo permitido por la sección de generación.

En una segunda aproximación, para ratificar el ancho calculado en lo descrito anteriormente, a partir de una relación entre tirante y ancho de solera en un canal rectangular que conduce un flujo crítico con el mínimo perímetro<sup>5</sup>, se obtuvo la **Ec. 2-18**.

**Ec. 2-18:** Relación de ancho y tirante crítico para una sección rectangular

$$b = \frac{4}{3} y_c$$

Dónde:  $y_c$  – tirante crítico [m]<sup>6</sup>.

Con dicha relación se propusieron tirantes a partir de 0.05 m hasta 1.60 m observando el comportamiento donde converge, que para un tirante máximo de 1.60 m, el ancho que lo soporta es de aproximadamente 2.13 m.

Una vez definido lo anterior, a partir de la ecuación **Ec. 2-16**, es modificada para un canal rectangular de la siguiente manera (**Ec. 2-19**):

**Ec. 2-19:** Energía específica para un canal rectangular para régimen crítico

$$E_s = \frac{b^2 2g y^3 + Q^2}{b^2 2g y^2}$$

Dónde:  $y$  – tirante [m]

$g$  – aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$Q$  – es el caudal [ $m^3/s$ ]

$b$  – ancho del canal [m]

Se calcularon los tirantes alternos de la sección tomando en cuenta una energía específica de 1.6 metros a partir de la ecuación obtenida, **Ec. 2-19**, con respecto a los caudales hidrométricos medios de cada mes.

**Ec. 2-20:** Tirantes alternos en un canal rectangular

$$y^3 - E y^2 + \frac{Q^2}{b^2 2g} = 0$$

Dónde:  $y$  – tirante [m]

<sup>5</sup> El cálculo se realizó a partir de la ecuación de energía específica mínima, desglosándola para un canal rectangular.

<sup>6</sup> Para el caso de aplicación, el  $y_c$  se tomó igual a 1.60 m, el máximo permisible por el tipo de sección

g – aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]  
 Q – es el caudal [m<sup>3</sup>/s]  
 b – ancho del canal [m]  
 E – energía específica [m]

De igual forma se realizó el cálculo de energía mínima y tirante crítico, a partir de las ecuaciones desarrolladas para flujo uniforme en un canal rectangular **Ec. 2-21** y **Ec. 2-22** respectivamente, para cada mes del año.

**Ec. 2-21:** *Energía mínima en un canal rectangular*

$$E_{\min} = y_c + \frac{y_c}{2}$$

Dónde:  $y_c$  – tirante critico [m]

**Ec. 2-22:** *Tirante critico en un canal rectangular*

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$$

Dónde: g – aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]  
 Q – es el caudal [m<sup>3</sup>/s]  
 b – ancho del canal [m]

Con lo descrito en esta sección a partir de los caudales de generación (caudal aprovechable de generación), se realizó un modelado del tirante con respecto a cada mes del año, para obtener el comportamiento de energía específica.

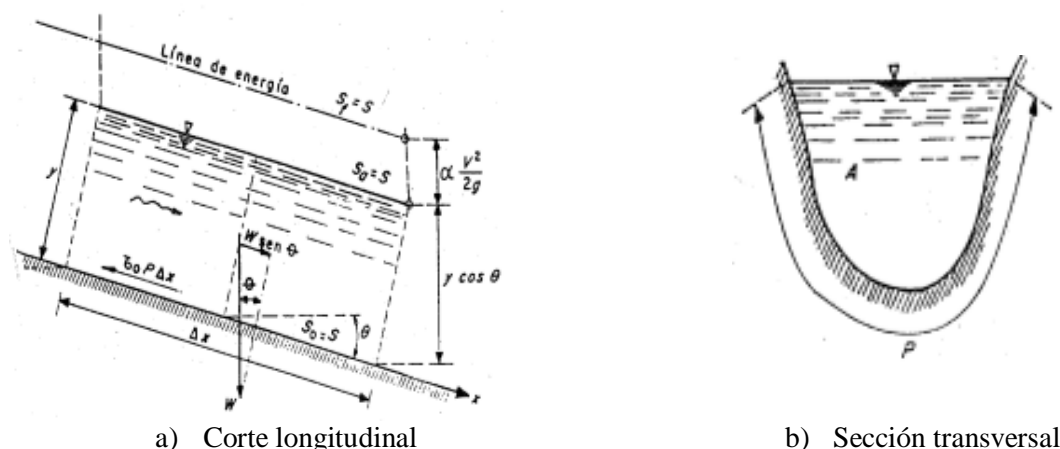
### 2.7.2 Dimensionamiento a flujo uniforme

El flujo uniforme es una condición básica que debe considerarse en los problemas de diseño, ya que rara vez ocurre en los canales naturales debido a que no son prismáticos y/o existen controles, como vertedores o compuertas. En un canal de cierta pendiente y rugosidad, que debe de conducir un caudal conocido, el estado de flujo uniforme es el criterio que rige el área de la sección transversal mínima requerida, ya que la tendencia natural de flujo será tratar de alcanzar dicho estado (74).

Por definición, el flujo uniforme se presenta cuando (**Figura 41**):

- La velocidad, el tirante y el área hidráulica, permanecen constantes en cada sección
- La línea de energía, la superficie libre del agua y la plantilla del canal son paralelas.

El flujo uniforme puede ser laminar o turbulento, la única ocurrencia genuina de flujo laminar se presenta en el drenaje del agua de lluvia sobre cubiertas, techos y pavimentos de poca pendiente, debido a la pequeña magnitud del tirante (74).



**Figura 41:** Volumen de control de flujo uniforme

El diseño a flujo uniforme, permitió el dimensionamiento de la pendiente del canal necesaria para soportar el caudal máximo presentado en un Tr de 50 con el método SCS, equivalente a  $11.40 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tomando en cuenta la **Ec. 2-23** se determinó la pendiente del canal para soportar dicho caudal, dando como resultado una pendiente equivalente a 0.41%, tomado un coeficiente de rugosidad de Manning  $n = 0.013$ , correspondiente a un canal revestido de cemento o mortero acabado liso (74).

**Ec. 2-23:** Ecuación de Manning:

$$Q = \frac{A}{n} R h^{2/3} s^{1/2}$$

Dónde:  $A$  – área húmeda [ $\text{m}^2$ ]  
 $Q$  – caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $s$  – pendiente del lecho [ $\text{m}/\text{m}$ ]  
 $n$  – coeficiente de Manning.

Con lo anterior, se realizó la curva Gasto-tirante, para lograr una comparación directa del caudal con el método racional y SCS. Con ello se observó el comportamiento del canal con los caudales de avenidas máximas y los caudales máximos de los datos hidrométricos calculados a partir del software Hiestad 3.0. Esto permitió hacer el cálculo de la compuerta que contrala el paso de flujo entre los canales, por lo que el funcionamiento hidráulico de ambos canales completamente abiertos logra soportar el paso de un caudal de hasta  $49.23 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 2.7.3 Influencia del caudal ecológico<sup>7</sup> en el diseño

Existen diversas metodologías para el cálculo de los caudales ecológicos, ya que se tiene que entender el papel que desempeñan los componentes del régimen hidrológico natural en la estructura y funcionamiento del ecosistema acuático que será afectado, para así cuantificar los caudales según la época del año, esto con el fin de mantener su equilibrio, conservación y/o restauración.

El caudal ecológico calculado se muestra en la **Tabla 8**, donde el 15% del caudal total se deja libre para garantizar el escurrimiento en una sección de 15 m de análisis de constricción del canal. Con esto se determina que no se tiene una alteración total. Es importante aclarar que la obra no se ha planteado con

<sup>7</sup> Se entiende por caudal ecológico para fines de este trabajo como el caudal mínimo libre.



algún tipo de almacenamiento por lo que el flujo para turbinar no recibirá ningún tipo de perturbación ni se verá mermado el flujo antes y después del aprovechamiento.

**Tabla 8:** Caudal ecológico aprovechable para generación hidroeléctrica

Caudal aprovechable [m³/s]									
Caudal Medio Mensual = CMM				Escurrimiento Medio Anual = EMA					
Intervalos de valores de referencia para régimen de caudal ecológico en corrientes permanentes									
Mes	CMM	Deficiente		Moderado		Bueno		Muy Bueno	
		95%	86%	85%	76%	75%	61%	60%	20%
Enero	0.263	0.250	0.226	<div><div></div></div> 0.223	0.200	0.197	0.160	0.158	0.053
Febrero	0.206	0.196	0.177	<div><div></div></div> 0.175	0.157	0.154	0.126	0.124	0.041
Marzo	0.131	0.125	0.113	<div><div></div></div> 0.111	0.100	0.098	0.080	0.079	0.026
Abril	0.169	0.161	0.145	<div><div></div></div> 0.144	0.128	0.127	0.103	0.101	0.034
Mayo	0.247	0.235	0.213	<div><div></div></div> 0.210	0.188	0.185	0.151	0.148	0.049
Junio	0.682	0.648	0.586	<div><div></div></div> 0.579	0.518	0.511	0.416	0.409	0.136
Julio	1.336	1.270	1.149	<div><div></div></div> 1.136	1.016	1.002	0.815	0.802	0.267
Agosto	1.397	1.327	1.202	<div><div></div></div> 1.188	1.062	1.048	0.852	0.838	0.279
Septiembre	1.537	1.460	1.322	<div><div></div></div> 1.307	1.168	1.153	0.938	0.922	0.307
Octubre	0.847	0.805	0.729	<div><div></div></div> 0.720	0.644	0.635	0.517	0.508	0.169
Noviembre	0.305	0.290	0.263	<div><div></div></div> 0.259	0.232	0.229	0.186	0.183	0.061
Diciembre	0.223	0.212	0.192	<div><div></div></div> 0.189	0.169	0.167	0.136	0.134	0.045
Promedio	0.612	0.581	0.526	0.520	0.465	0.459	0.373	0.367	0.122

Los caudales ecológicos juegan un papel importante en el control de compuerta. La abertura que permite al tirante mantenerse por debajo de 1.60 m en la sección de canal a turbinar, esto también admite mantener un escorrentamiento perene aprovechable para otros fines en la sección de 15 m de longitud del canal paralelo al de generación.

#### 2.7.4 Viabilidad ambiental

Para garantizar las obras hidráulicas existen distingos parámetros fijos para cumplir establecidos dentro de la normatividad mexicana (principalmente NOM-011-CONAGUA-2015), para fines del trabajo de investigación se realizó un estudio de viabilidad ambiental, principalmente para la construcción de obra, durante la operación y posterior a ella, como parámetro inicial partir del análisis de los caudales hidrométricos medios.

En la **Tabla 9**, se describe el Régimen Hidrológico Natural (RHN) y el Régimen Hidrológico Actual (RHAc), donde este análisis consiste en determinar el régimen de volúmenes circulantes de agua de manera mensual y anual del estado natural y actual, y el grado de afectación que tiene el último sobre el primero. El objetivo radica en determinar si existe o no afectación significativa del régimen natural debido al paso del tiempo (76).

Para determinar la afectación se consideran datos históricos de (40 años mínimos) de registro por parte de la estación hidrométrica más representativa de la zona de estudio, las etapas subsiguientes se describen a continuación (76):

- Separa los caudales por mitad de acuerdo al año natural de registro, en un rango de 20 años respectivamente.
- Calcular para cada mes del año la serie RHN en el régimen de caudales máximos y mínimos ordinarios de acuerdo con los percentiles 90 y 10.
- Verificar si los caudales circulantes actualmente (RHAc) a manera mensual y anual se encuentran contenidos en el régimen de caudal ordinario máximo (P90) y mínimo (P10) sugeridos por el RHN, bajo las condiciones:

*“Si el régimen actual cumple en magnitud mensual y anual más de un 50% con relación al régimen natural se considera como hidrológicamente no alterado.”*

*“Si el cumplimiento del régimen actual es menos que el 50% en su magnitud mensual o anual con relación al régimen natural se considera significativamente alterado.”*

Los resultados que permitieron dar continuidad con el análisis de obra de toma de acuerdo a las características del comportamiento de los respectivos regímenes se muestran en la **Tabla 9**, se concluye el régimen de flujo no se encuentra alterado por lo que se puede proseguir con el análisis de aprovechamiento hidroeléctrico del flujo.

**Tabla 9:** Régimen de caudales ordinarios acorde al RHN y RHAc

Mes	RHN			RNAc	No. de meses que cumple	Total meses	Porcentaje de cumplimiento
	Percentil 10	Percentil 50	Percentil 90	Q [m <sup>3</sup> /s]			
Enero	0.103	0.155	0.278	0.26	16	18	88.89%
Febrero	0.067	0.116	0.243	0.21	16	18	88.89%
Marzo	0.058	0.108	0.179	0.13	12	18	66.67%
Abril	0.072	0.152	0.243	0.17	15	18	83.33%
Mayo	0.084	0.181	0.432	0.25	14	18	77.78%
Junio	0.256	0.524	1.091	0.68	14	18	77.78%
Julio	0.774	1.301	2.254	1.34	11	18	61.11%
Agosto	1.003	1.343	2.575	1.40	9	18	50.00%
Septiembre	0.574	1.079	2.438	1.54	12	18	66.67%
Octubre	0.262	0.448	1.966	0.85	14	18	77.78%
Noviembre	0.182	0.238	0.487	0.31	10	18	55.56%
Diciembre	0.128	0.192	0.266	0.22	13	18	72.22%
<b>Total general</b>					156	216	72%

## 2.8 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE FLUJO EN LA OBRA DE TOMA.

La modelación de flujo en el canal y en las secciones de río contiguas correspondientes, tanto aguas arriba como aguas abajo, tiene como finalidad el análisis de turbulencia para la ubicación de la turbina para el aprovechamiento hidroeléctrico. Así como el análisis en temporadas de avenidas máximas a un periodo de retorno de 50 años con el fin de analizar el comportamiento del canal.

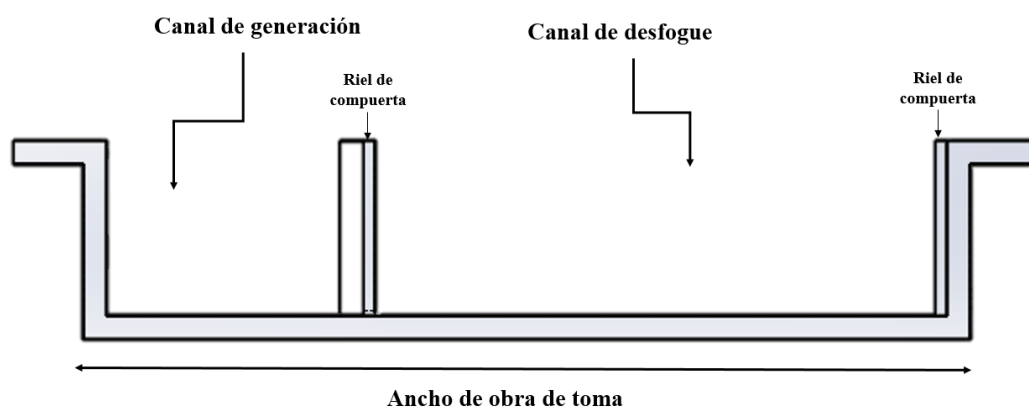
La modelación a partir de CFD, permite en la rama de mecánica de fluidos, observar y analizar el comportamiento de un fluido o fluidos dentro de un medio, la aplicación de esta es diversa de acuerdo a los objetivos del proyecto deseado, para fines del proyecto descrito, se utilizó con el fin de observar el

diseño de obra de toma bajo distintas condiciones de flujo, para garantizar el funcionamiento del mismo con fines energéticos, e hidráulicos.

### 2.8.1 Construcción del modelo de flujo del canal

Para la construcción del canal se utilizó el software de *AutoCad 2018*, esto para dar una vista preliminar del mismo, mientras que para la construcción del modelo general de flujo se utilizó el software *SolidWorks 2012*; utilizado para dibujo y modelado en 3D, a partir de las secciones contiguas de río correspondiente aguas arriba y aguas abajo de la sección referencia (estación 3720 de acuerdo a la longitud de la batimetría o de acuerdo a la distancia aguas arriba de la presa Ignacio Ramírez) se realizó el dimensionamiento longitudinal del canal.

En la modelación se generó un sólido, el cual representa el fluido dentro del canal y las secciones del río. Para lograr una transición de río al canal se utilizaron diversas herramientas del software *SolidWorks*. Se delimitaron las compuertas y la ubicación específica de ambos canales. En la **Figura 42** se observa la vista frontal del modelo 3D de obra de toma planteado para el aprovechamiento energético.



**Figura 42:** Características de la obra de toma, vista frontal.

### 2.8.2 Modelado de flujo ANSYS

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga de resolver numéricamente las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo de un fluido en un dominio espacial y temporal; es decir las ecuaciones de Navier-Stokes que implican los principios de las ecuaciones de conservación de masa y momentum, para el caso de modelo de flujo bifásico mediante el método de volúmenes finitos da solución aproximada a las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS) además contiene las características para la modelación física que se necesitan para modelar flujo y turbulencias. Se utilizan modelos espaciales que dan la capacidad al programa de simular modelos multifase (77).

Para el caso de estudio en cuestión se utilizó el modelo VOF (Volumen Of Fluid) el cual puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un conjunto único de ecuaciones de momentum y arrastre en la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de la ruptura del chorro, el movimiento de burbujas grandes en líquidos, el movimiento del

líquido después de una ruptura de la presa y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz de líquido-gas (78).

El modelo resulta complejo debido a la solución de la ecuación de continuidad por la fracción de volumen de una o más fases. Para la “q-ésima” fase, la ecuación tiene la siguiente forma (77):

**Ec. 2-24:** Ecuación de continuidad por fracción de volumen

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp})$$

Dónde:  $\alpha_q$  – Celda en la fase.

$\dot{m}_{qp}$  – transferencia de masa en la fase q hasta la fase p [kg/s]

$\dot{m}_{pq}$  – transferencia de masa en la fase p hasta la fase q [kg/s]

$S_{\alpha_q}$  – Toma el valor de cero, se puede especificar una función de transferencia de masa para cada fase.

La formulación de VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se combinan entre sí. Para cada fase adicional que se agregue al modelo, se introduce una variable. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases se suman a la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores promediados en volumen, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases se conozca en cada ubicación. Por lo tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases, o representativas de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción de volumen, bajo las siguientes condiciones (78):

$$\begin{aligned} \alpha_q &= 0; \text{ La celda esta vacia} \\ \alpha_q &= 1; \text{ La celda esta llena} \\ 0 < \alpha_q < 1; &\text{ Contiene interfaces de fluidos} \end{aligned}$$

Para el caso dos fases, la segunda debe ser la que contenga el fluido más denso. La ecuación de fracción de volumen no será resuelta para la primera fase, para esta, se calcula basado en la siguiente restricción  $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ . La ecuación de fracción de volumen se puede resolver ya sea por el esquema implícito o explícito. Para el caso estacionario se decidió que se iba a resolver mediante el esquema implícito debido a que para este, no es necesario implementar el número de Courant, lo que podría volver inestable el modelo. La ecuación del esquema implícito se implementa en el software de la siguiente manera (78).

**Ec. 2-25:** Ecuación de sistema implícito modelo VOF

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{qf}^{n+1}) = \left[ S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V$$

Debido a que esta ecuación requiere los valores de la fracción de volumen en el paso de tiempo actual (preferiblemente que al paso de tiempo anterior como para el esquema explícito), una ecuación escalar estándar de transporte se resuelve iterativamente para cada una de las fracciones de volumen de la segunda fase a cada paso de tiempo. La diferencia entre ambos esquemas es que la formulación explícita no requiere una solución iterativa de la ecuación de transporte durante cada paso de tiempo; además, el esquema explícito solo puede usarse cuando una solución sea dependiente del tiempo (78).

Las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte están determinadas por la presencia de las fases componentes en cada volumen de control, por lo que de manera general se resume en: para un sistema de  $n$  fases, la densidad promediada por fracción de volumen toma la siguiente forma (78)

**Ec. 2-26:** Comportamiento de la densidad en "n" fases

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q$$

Dónde:  $\alpha_q$  – Celda en la fase.  
 $\rho_q$  – Densidad en la fase q [kg/m<sup>3</sup>]

Una sola ecuación de momentum se resuelve en todo el dominio, y el campo de velocidad resultante se comparte entre las fases. La ecuación de momentum, que se muestra a continuación, depende de las fracciones de volumen de todas las fases a través de las propiedades.

**Ec. 2-27:** Ecuación de momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

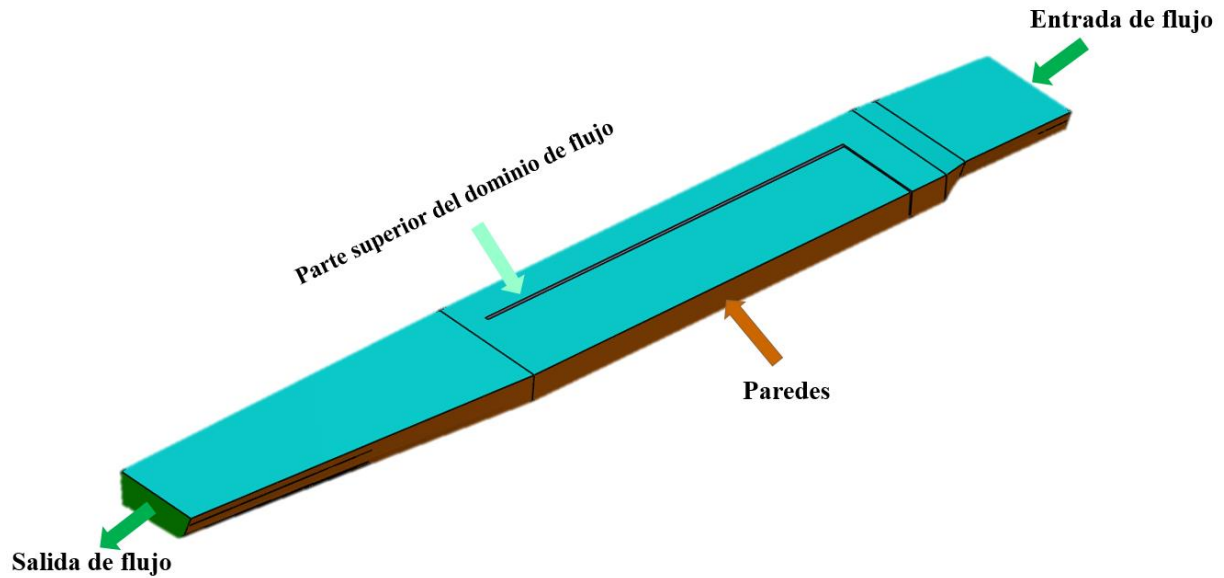
Dónde:  $\mu$ – Viscosidad dinámica [kg/m-s].  
 $\rho$ – Densidad en la fase [kg/m<sup>3</sup>]  
 $P$ – Presión [Pa, N/m<sup>2</sup>]  
 $g$ – gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Dependiendo de la definición del problema, pueden incluirse ecuaciones escalares adicionales en su solución. En el caso de cantidades de turbulencia, se resuelve un solo conjunto de ecuaciones de transporte, y las variables de turbulencia (77).

### 2.8.2.1 Geometría y fronteras del dominio

Para el caso del CFD utilizado, es necesario el diseño de una geometría que represente el flujo dentro de la obra de toma, ya que esta representa el volumen de control general, en la **Figura 43** se muestra la geometría del flujo, y las características generales de la misma, donde esta se generó a partir de los pasos de diseño propios del software de dibujo 3D mencionado.

En el modelado de volumen de control se consideraron características de diseño generales solicitadas por el software, como la modelación específica del flujo, donde aquellas áreas que funjan como delimitación del flujo tendrán que representarse como zonas vacías, como para el caso específico, el muro y compuerta.



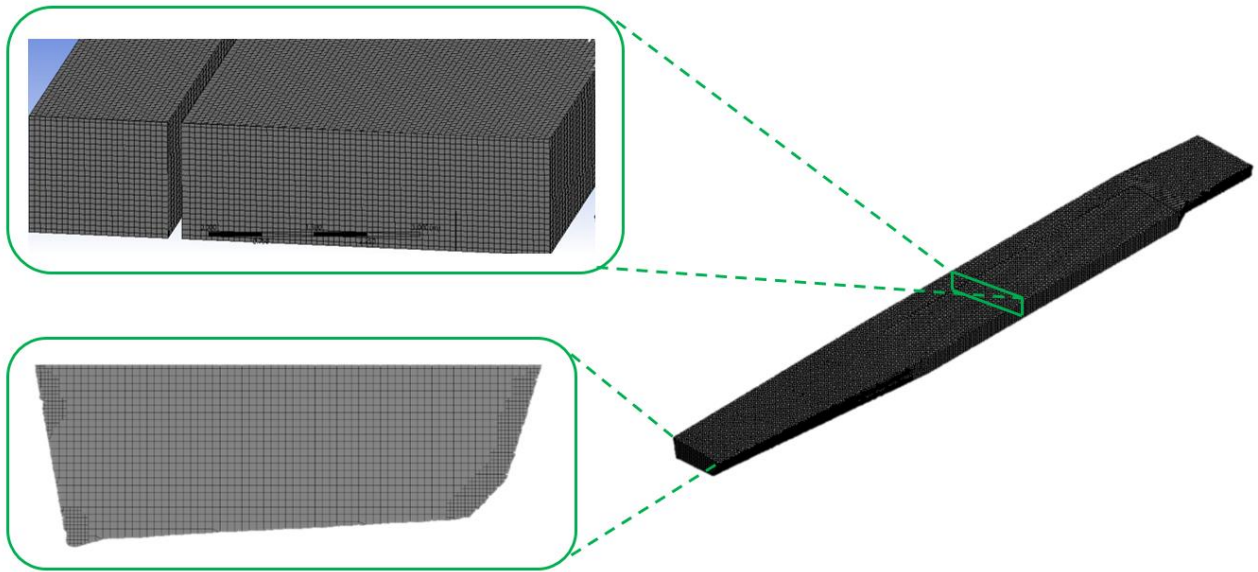
**Figura 43:** Dominio de flujo para modelado

#### 2.8.2.2 Mallado

Previo al mallado en la visualización en el apartado de importación del volumen de control (**Anexo 4**) al software se asignaron nombres a los planos correspondientes para las condiciones de contorno, es decir entradas y salidas de flujo, así como paredes y fondos dentro de la geometría.

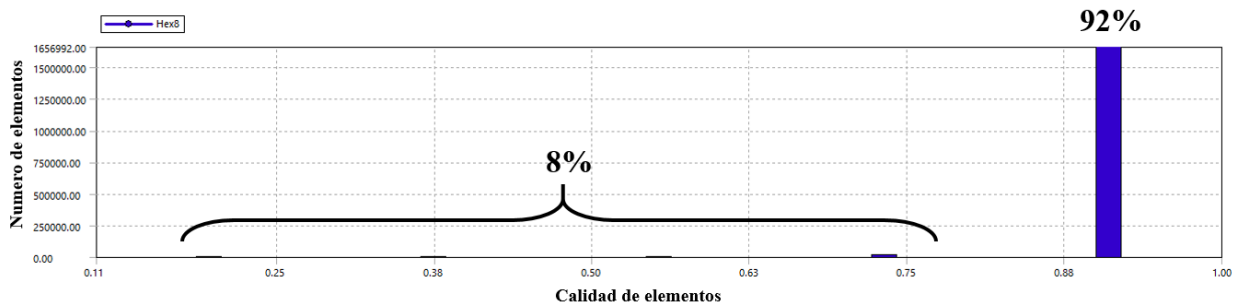
En primera aproximación se realizó un mallado con refinamiento en zonas específicas del modelo, es decir en la compuerta y las paredes equivalentes de la misma, sin embargo, esto aumentó el número de elementos, por lo tanto, retrasó el tiempo de cálculo. Cabe mencionar que entre mayor sea el número de elementos, el tiempo de cálculo aumenta, el tipo de refinamiento se recomienda principalmente para geometrías complejas y/o de dimensiones considerablemente inferiores, de acuerdo al tamaño y tipo de elemento.

En segunda aproximación; se empleó un tipo de mallado estructurado, sin refinamiento en zonas específicas para la geometría con elementos hexaédricos ya que estos resultan eficientes para complementar espacios, y toleran un alto rango de oblicuidad y alargamiento antes de afectar la solución, por lo que de acuerdo a la calidad de malla obtenida y el tipo de geometría, resultó ser la adecuada para el análisis (**Figura 44**).



**Figura 44:** Desratización del dominio

La malla resultante de la segunda aproximación tiene un total de 3397125 (variable de acuerdo a la apertura de compuerta) elementos, un tamaño de 40 mm a 80 mm como mínimo y máximo respectivamente, en la **Figura 45** se describen la calidad de elementos de la malla; donde el 92% de los elementos tiene una calidad cercana a 1, en rango del 0.93 por lo que se deduce que es una malla de buena calidad para el modelado de acuerdo con lo recomendado (78)



**Figura 45:** Calidad y número de elementos de malla

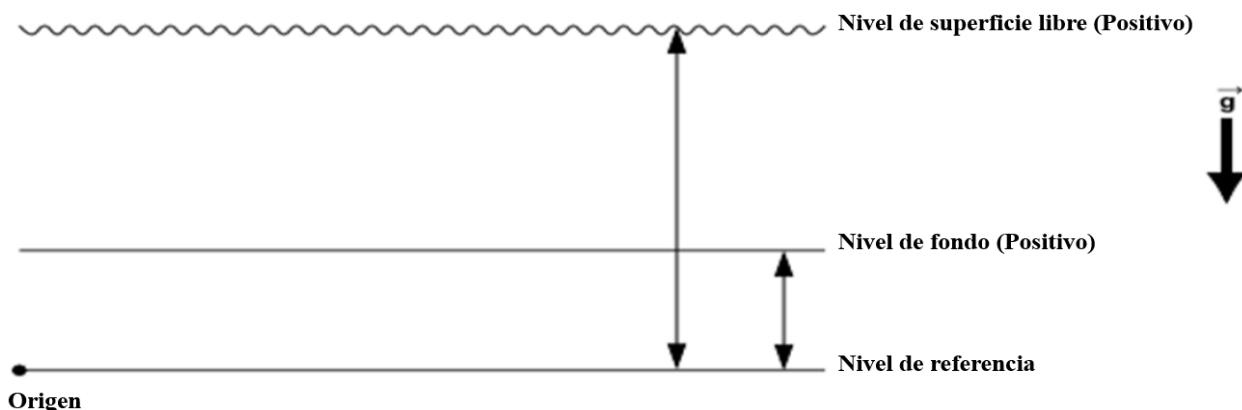
### 2.8.2.3 Configuración de parámetros

Las simulaciones se realizaron bajo los parámetros de estado estacionario donde se resuelven las respectivas ecuaciones en las fracciones de volumen de la segunda fase determinada (Agua líquida). Se seleccionó el modelo  $k-\epsilon$ , donde ( $\epsilon$ ) representa la tasa disipación de la energía cinética de turbulencia ( $k$ ) dentro del sistema, el modelo implementa ecuaciones que representan las propiedades turbulentas del flujo.

Para la aplicación del modelo bifásico VOF para canales de aflujo a superficie libre, se establecieron dos fases, primaria y secundaria, donde la primera se conforma por el fluido menos denso (aires) y la segunda por el fluido más denso (agua líquida).



Las condiciones de entrada y salida para monitoreo se basaron en flujo másico desde la entrada bajo condiciones establecidas por el mismo modelo (**Figura 46**), se requiere la altura de lámina (tirante) por lo que es importante obtenerlo a partir de identificar los puntos de referencia del modelo de acuerdo a lo descrito, con respecto a la geometría, y a los escenarios elegidos para la simulación, con respecto a los caudales.



**Figura 46:** Niveles de referencia para canales abiertos, modelo VOF

Para el caso de estudio se erigieron tres escenarios principales, con la información respectiva de caudal<sup>8</sup> transformado a flujo másico para el mes de Julio, donde con la información de las respectivas simulaciones con la información de acuerdo al flujo másico medio hidrométrico se realizaron las respectivas correcciones de obra de toma, mencionadas en una sección posterior. La información de los escenarios respectivamente se muestra en la **Tabla 10**.

**Tabla 10:** Flujo másico y tirante para modelación

	$\dot{m}$ , [kg/s]	y ,[m]
Medio hidrometrico	1134.9776	0.6
Racional Tr= 20 años	4216.202	1.19
SCS-HMS Tr= 50 años	11389.74	2.15

- Calibración y validación

Para la calibración y validación del modelo se ajustaron los datos de entra obtenidos a partir del modelo 2D de HEC-RAS y las alturas de tirante de agua a partir de los aforos en sitio dependiendo del escenario simulado correspondiente.

<sup>8</sup> Se realizó la respectiva transformación de caudal a flujo másico bajo la condición de equivalencia de densidad del agua a 999.1 kg/m<sup>3</sup>

## **2.9 CARACTERÍSTICAS Y GENERALIDADES DE TURBINAS HIDROKINÉTICAS (79).**

Se han identificado dos métodos para generar energía a partir de flujos de agua. Uno es el conocido sistema de generación hidroeléctrica que busca el aprovechamiento de la energía potencial del agua que se encuentra almacenada en una represa; el otro método pretende aprovechar la energía cinética de las corrientes de ríos, mares o canales de irrigación, a partir de la captura de la mayor cantidad de masa de agua posible, que en este caso tendría como característica velocidades y presiones bajas. Para convertir energía de una corriente de agua se han identificado variables fundamentales como la densidad y velocidad del fluido, al igual que el área de sección transversal a través de la cual podría ser realizada la conversión.

Los sistemas de turbinas cinéticas, utilizan la vía natural de las corrientes de agua, evitando la intervención en aspectos como en el desvío de agua a través de canales en los lechos de los ríos o la necesidad de tuberías. Al comparar el eje del rotor con respecto al flujo del agua, se clasifican en Turbinas de Eje Horizontal, Turbinas de Eje Vertical y Turbinas de flujo cruzado

- ***Eje Horizontal:***

La aplicación de este tipo de turbina se presenta con mayor frecuencia en convertidores que utilizan las corrientes oceánicas para la generación.

- ***Flujo Cruzado:***

Son turbinas con el eje perpendicular a la corriente de agua y paralelo a la superficie. Este tipo de turbinas tiene mejor aplicación en flujos largos de agua y cabezas bajas, por cuanto permiten que el agua fluya en una primera etapa, hacia el interior de las cuchillas y en una segunda cruzando de adentro hacia afuera.

- ***Eje Vertical:***

Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del agua, disposición que facilita la colocación de los demás mecanismos requeridos para la generación de energía (el generador, la caja de engranajes, cojinetes) sobre el nivel del agua.

## Capítulo 3

### 3. Resultados y discusión

En este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir de la metodología planteada y con respecto al objetivo general (sección 2.3) y los objetivos específicos planteados (sección 2.4). Se exponen gráficos y tabulaciones que resumen los resultados de cada parte de la metodología, y con ello descripciones de lo observado durante el desarrollo de la investigación.

En el apartado 3.1 a 3.2 se describen los resultados obtenidos a partir de los diferentes métodos de análisis aplicados para la estimación de caudales en la zona de estudio, así como los resultados alcanzados a partir de la modelación hidráulica y la estimación de energía específica para la evaluación espacio temporal de la zona, comparando y analizando los respectivos métodos a partir de gráficos.

En la sección 3.3 se exponen los resultados obtenidos a partir del dimensionamiento de la obra de toma, las características de la misma, así como el comportamiento energético en la sección dimensionada, con la finalidad de elegir algún modelo de potencial aplicación energética en el cauce. Esto incluye la simulación del canal con el cauce del río, en la que se analizan factores de velocidad y turbulencia para la colocación de la turbina en una zona específica de dicho canal.

#### ***3.1 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL***

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los SIG para el trazado del área de estudio, las características morfométricas obtenidas, los gráficos de análisis de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, los resultados de la aplicación de los métodos hidrometeorológicos, los resultados de los caudales aforados en sitio, así como los resultados de la modelación hidráulica y los gráficos de energía y potencia a distintos escenarios para la viabilidad del proyecto.

##### ***3.1.1 Parámetros morfométricos de la cuenca de estudio***

Los resultados obtenidos a partir de la modelación de la zona, de acuerdo con la ubicación mostrada en la **Figura 27**, se exponen en la **Tabla 11**. Se observa que el valor de la pendiente de la red hídrica y la longitud de la misma entre sub-cuencas del punto A al punto B no es muy variante (< 10%), con dichas propiedades principales se realizó la aplicación de los respectivos métodos de cálculo.

**Tabla 11:** Propiedades morfométricas de las subcuencas

	<i>/Cuenca General</i>	<i>Subcuenca sección A</i>	<i>Subcuenca sección B</i>
Área de la cuenca [km <sup>2</sup> ]	224.84	168.33	140.08
Perímetro de la cuenca [km]	90.00	71.32	75.01
Pendiente promedio de la cuenca [%]	11.67	13.35	14.00
Longitud del curso principal [km]	24.10	25.11	26.83
Pendiente promedio de la red hídrica [%]	1.34	1.70	1.70
Orden de la red hídrica	7	5	9

Al observar el área de cada una de las respectivas cuencas, la sección correspondiente al punto A es de mayor área. La longitud del cauce principal es menor con respecto a la del punto B, es por ello que esto marca una pauta con los resultados establecidos en la aplicación de los respectivos métodos de cálculo de caudales.

De acuerdo con lo observado entre las características de las redes hídricas que conforman cada una de las cuencas, la que tiene un mayor orden de red hídrica es la sección B, es decir, cuenta con mayor número de afluentes y escurrimientos (**Figura 47**).

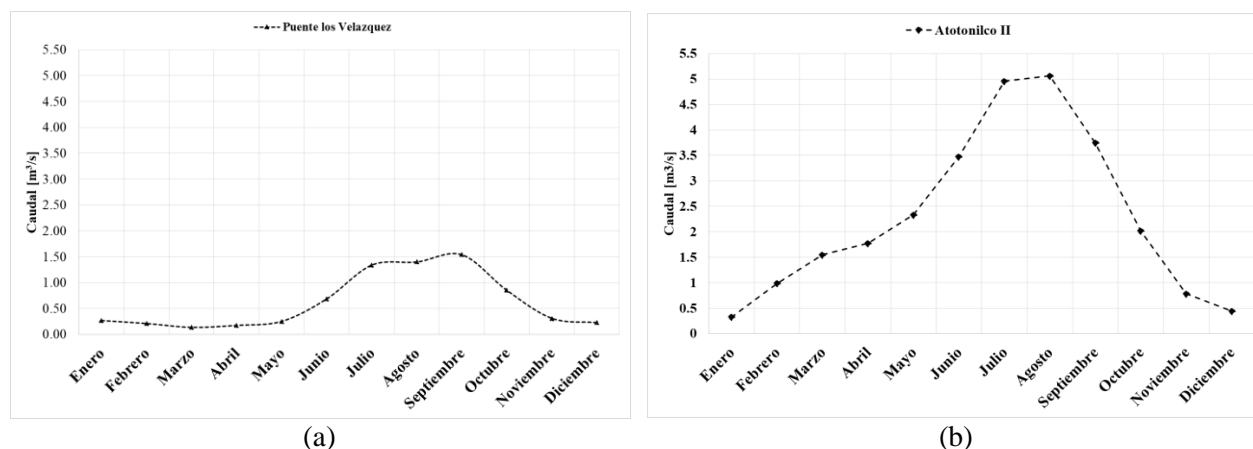
**Figura 47:** Red hídrica de las subcuencas trazadas.

### 3.1.2 Análisis de estaciones hidrométricas

En la **Figura 48** se observan los resultados obtenidos a partir del análisis de las dos estaciones hidrométricas seleccionadas, tomando en cuenta datos desde 1963 hasta 2014. Se observa que los meses más caudalosos son Julio, agosto y septiembre, que coinciden con los meses más lluviosos para la región.

De acuerdo con lo observado en el análisis de la estación “Los Velázquez”, el caudal medio más alto registrado por esta estación, fue de 3.8 m<sup>3</sup>/s en el mes de septiembre del año 1984. En la figura también se pueden apreciar los caudales obtenidos a partir de los datos de la estación hidrométrica “Atotonilco II”. Se observa la diferencia considerable entre caudales de ambas estaciones, ya que el de la estación “Puente Los Velázquez” oscila entre 0.13 y 1.60 m<sup>3</sup>/s, y el de la estación “Atotonilco II” oscila entre 0.2 y 5 m<sup>3</sup>/s. Esto ocurre, ya que la estación “Atotonilco II” se encuentra sobre el embalse y registra el caudal total de todos los afluentes que llegan a ese punto, mientras que la estación “Puente Los Velázquez” registra solamente los caudales del río en análisis y algunos otros afluentes. Es por ello que se determinó no

alimentar el software de modelado con los resultados de la estación “Atotonilco II”, ya que esto sobreestimaría los resultados del modelado.



**Figura 48:** Caudales promedios mensuales, comparación de datos experimentales e hidrométricos, estaciones: (a) “Puente Los Velázquez” y (b) “Atotonilco II”, río La Gavia.

Con el análisis anterior se determinó un intervalo de comportamiento del caudal de la zona de estudio durante un año (**Tabla 12**), lo que sirvió como puntos de comparación con los caudales calculados a partir de los métodos teóricos, así como en los aforos mensuales.

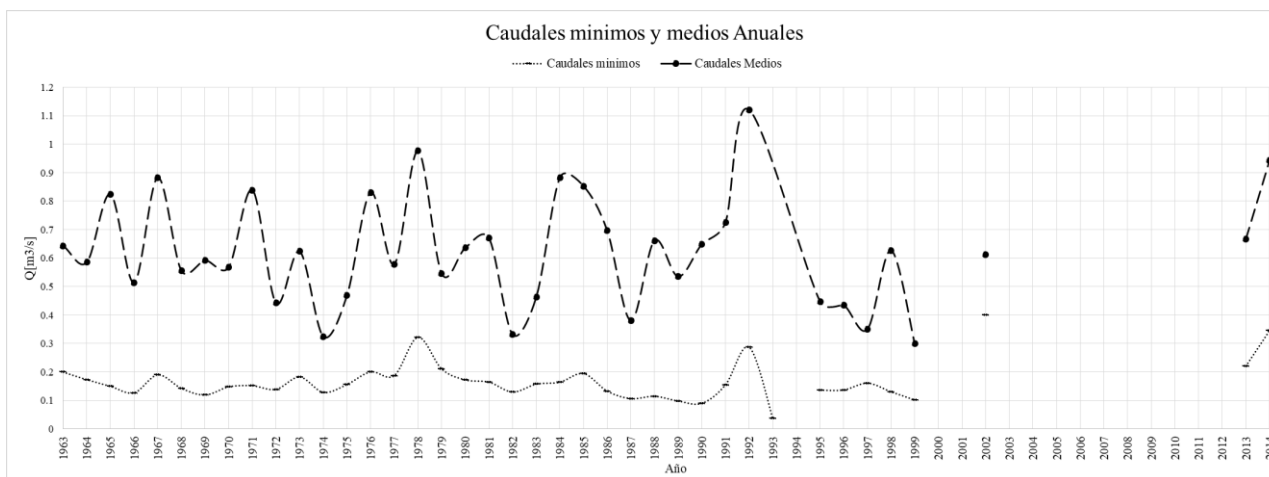
**Tabla 12:** Intervalos de caudales mensuales, registros de la estación “Los Velazquez”

Mes	$Q_{\text{Intervalo}}$	$Q_{\text{Promedio}}$	Mes	$Q_{\text{Intervalo}}$	$Q_{\text{Promedio}}$
Enero	$0.114 \leq 3.54$	0.26	Julio	$0.241 \leq 12.22$	1.34
Febrero	$0.086 \leq 1.63$	0.21	Agosto	$0.285 \leq 12.58$	1.40
Marzo	$0.060 \leq 0.92$	0.13	Septiembre	$0.303 \leq 13.26$	1.54
Abril	$0.091 \leq 1.17$	0.17	Octubre	$0.236 \leq 7.92$	0.85
Mayo	$0.095 \leq 4.23$	0.25	Noviembre	$0.210 \leq 1.17$	0.31
Junio	$0.133 \leq 9.04$	0.68	Diciembre	$0.170 \leq 0.41$	0.22

El intervalo de caudales establecido a partir de la estadística realizada con los datos hidrométricos, permitió la modelación de escenarios, mínimos, medios y máximos, tomando en cuenta primordialmente los caudales medios para la modelación principal, ya que estos dan el escenario actual de funcionamiento del posible aprovechamiento hidráulico. El río cuenta, de acuerdo con la estación hidrométrica “Los Velázquez”, con un escurrimiento anual medio de  $7.34 \text{ m}^3/\text{s}$ , donde los meses de avenidas (Junio-Septiembre) representan el 69.7% del aporte anual, mientras que el resto del año se aporta 30.3%. Es decir, comparando los escurrimientos, el caudal de avenidas tiene una razón de cambio equivalente a 7.3 veces mayor a los meses de estiaje (Febrero-Mayo). En los meses de Octubre a Enero se tienen escurrimientos bajos, sin embargo, se tienen datos de lluvia fuerte, lo que ocasiona un incremento en el caudal registrado en las estaciones hidrométricas.

Con el análisis de caudales hidrométricos se puede determinar que el río cuenta con un potencial notorio en el escurrimiento de agua perenne, por lo que con el diseño adecuado se alcanzan niveles de agua

necesarios para el aprovechamiento. En la **Figura 49** se observan los caudales mínimos y medios registrados por la estación “Los Velázquez”, donde no se muestran los caudales máximos, esto se realizó con la finalidad de identificar los años más lluviosos y caudalosos registrados, asumiendo los picos mostrados el año más caudaloso fue 1992, donde en su caudal pico muestra un  $Q_{\text{máx}}$  de  $17.65 \text{ m}^3/\text{s}$ , cuyo escurrimiento anual promedio osciló en  $1.12 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo este 1.9 veces mayor que el escurrimiento total de los registros de la estación.



**Figura 49:** Caudales mínimos y medios anuales de la estación "Los Velázquez"

### 3.1.3 Resultados de estudio de datos hidrológicos

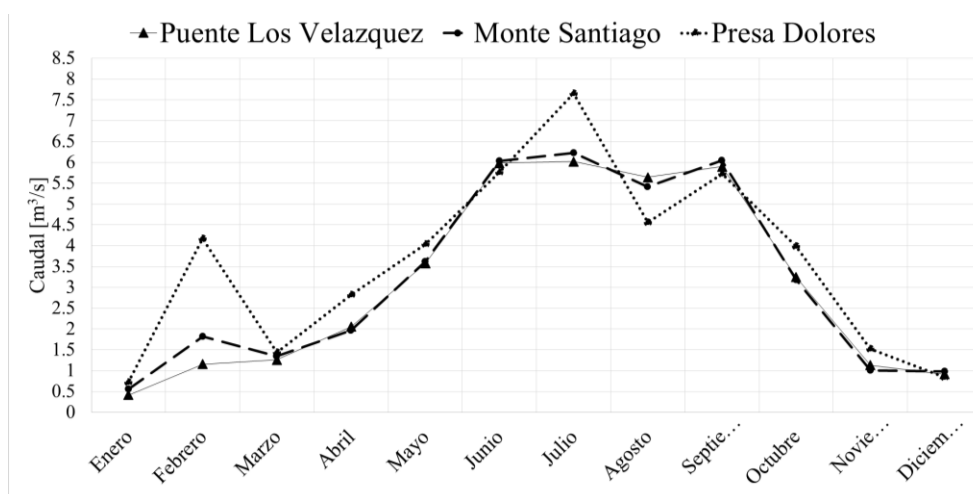
Los resultados de la aplicación de métodos teóricos de cálculo de caudales, permitieron llevar a cabo el análisis y la evaluación espacio-temporal del río durante seis periodos de retorno (2, 5, 10, 15, 20 y 50 años), así como calcular los datos para el modelado de comportamiento del río. De esta manera se logró obtener el conjunto de indicadores que auxiliaron a dar viabilidad al aprovechamiento energético.

En este apartado se muestran los gráficos de resultados de la aplicación de los métodos correspondientes, en cada una de las dos subcuencas generadas, la comparación entre los mismos y los resultados específicos respecto a cada una de las dos subcuencas antes mencionadas.

Para determinar la estación meteorológica que representa de forma significativa el comportamiento del caudal de toda la cuenca, se aplicó el método racional con los parámetros de la cuenca general para realizar el cálculo correspondiente de los caudales observados en la **Figura 50**. Donde los valores obtenidos a partir de la estación meteorológica “Presa Dolores”, muestran una línea de tendencia de comportamiento atípico con respecto a los registrados por las estaciones meteorológicas de “Monte Santiago” y “Los Velázquez”. Las estaciones “Monte Santiago” y “Presa Dolores” tienen una tendencia similar entre ellas y con los datos de aforos históricos de las otras estaciones meteorológicas, ambas representan el comportamiento del caudal de la zona de estudio, lo que se determinó a partir de la aplicación de funciones estadísticas a los datos.

Al realizar un análisis de calidad de los datos disponibles, lo que incluye cantidad, uniformidad y ubicación geográfica, se determinó que la estación “Puente los Velázquez” resultó más viable y fue la que representó de mejor manera los caudales en el tramo del río en estudio.





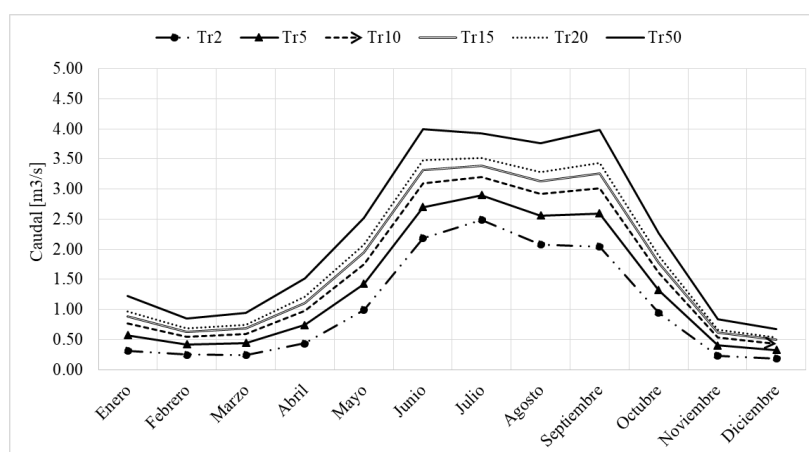
**Figura 50:** Comportamiento de caudales promedios anuales, Método racional

Los valores obtenidos con cada método, varían dependiendo de las características de las subcuencas, en este caso, las propiedades hidrológicas como longitud, pendiente del cauce principal, y el área. Esta última, es de los factores más sensibles en la aplicación de los métodos, pues de ella dependen otros factores, como Lag de cuenca y los coeficientes de escurrimiento.

### 3.1.3.1 Método Racional

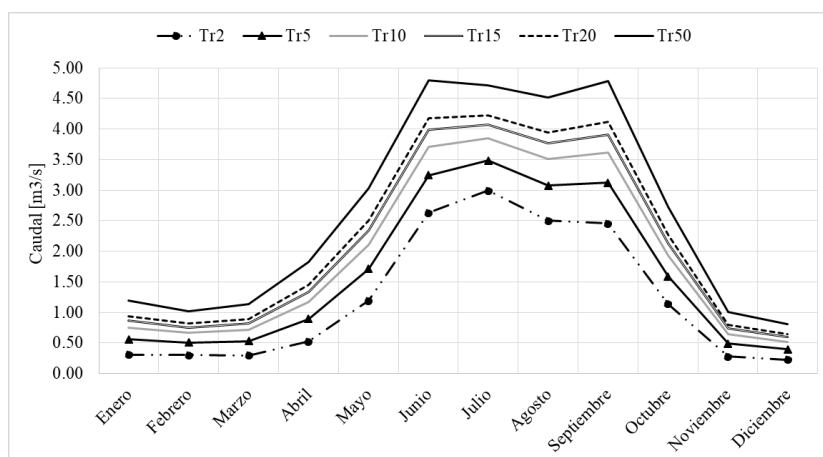
Los caudales obtenidos con este método, en comparación con los calculados a partir de las estaciones hidrométricas, resultan sobre estimados. Es importante recordar que este método se aplica principalmente a cuencas urbanas para obras de protección, por lo que no es acertado para aplicaciones con fines energéticos, aunque proporciona buenos datos preliminares. El comportamiento general resultante de los caudales es similar al de la estación “Puente los Velázquez” (**Figura 52** y **Figura 53**), mientras que los caudales máximos obtenidos en los periodos de retorno 50 y 20, se encuentran dentro del intervalo establecido en la **Tabla 12**.

Los meses más caudalosos mostrados por este método son junio, julio, agosto y septiembre (coincidentes con los datos hidrométricos). Los caudales máximos registrados para la subcuenca A y subcuenca B son  $3.92 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $4.71 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente, ambos para el mes de julio y con un  $\text{Tr} = 50$  años. Estos, a pesar de ser caudales pico, se encuentran dentro del intervalo establecido anteriormente, la diferencia de caudales entre los puntos de muestra para las secciones de cada subcuenca, es de alrededor del 16.79%. Esta variación se da principalmente por el área de influencia, ya que la subcuenca A muestra un área mayor para un periodo de retorno equivalente a dos años. Todo ello hace más inexacto el modelado de los mismos, lo que se puede observar al comparar la **Figura 51** y la **Figura 52**. Con un periodo de retorno menor los caudales van disminuyendo llegando a un intervalo similar al del calculado *in situ* y los caudales medios registrados por las estaciones hidrométricas.



**Figura 51:** Resultados del método racional para la estimación del caudal, para la sección A.

Al observar la comparación entre resultados de cada una de las subcuencas, se puede determinar que los caudales obtenidos en la sección B son mayores a los obtenidos en la sección A. Esto se debe a las características del escurrimiento, es decir, un orden de red más alto, lo que significa mayor cantidad de afluentes, así como la longitud de red hídrica mayor. Los caudales en la sección B son 84% veces mayores con respecto a los de la sección A.



**Figura 52:** Resultados del método racional para la estimación del caudal, para la sección B.

Este método tiene ciertas ventajas de aplicación, como lo es la cantidad de parámetros necesarios para el cálculo y el acercamiento con caudales medios aforados, así como los saltos entre periodos de retorno no resultan exorbitantes, manteniendo dentro del intervalo aceptable la estadística de comparación. En el **Anexo 5** se muestran los resultados numéricos del método racional.

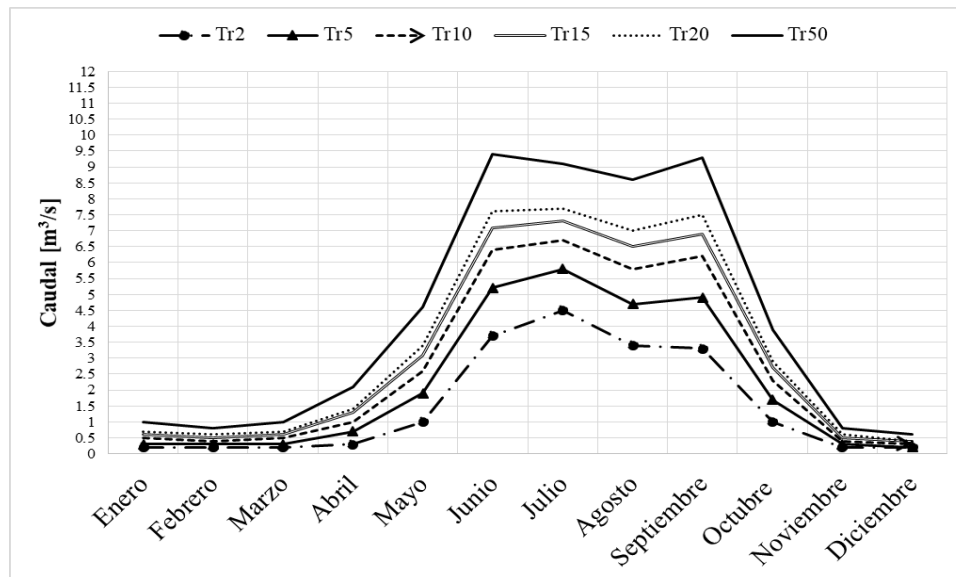
De acuerdo con el comportamiento de los resultados del método racional, En ambas gráficas, para los Tr, equivalentes a 5, 10, 15, 20 y 50 años, los incrementos entre valores estimados de caudal, se comportan de manera uniforme y constante para todos los meses.

### 3.1.3.2 Método HEC-HMS basado en SCS:

Este método se encuentra basado en los principios de cálculo del método SCS. En la **Figura 53** y **Figura 54**, se observan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del mismo, y en el **Anexo 5** se muestran las tablas con los valores numéricos. El comportamiento del caudal, calculado de la misma forma que en el método racional, es similar al de los caudales hidrométricos. Sin embargo, este método sobreestima los caudales aún más que el método Racional. Esto se debe a los parámetros tomados en cuenta y la exactitud del software, ya que al considerar un tiempo de retraso de la cuenca (Lag) y números de curva, ofrece una estimación hipotéticamente más acercada, pues como se sabe cualquier método que tome más parámetros de una muestra, aumenta su exactitud disminuyendo la incertidumbre<sup>9</sup>.

El Lag de la cuencas es independiente entre sí y depende de las características individuales de cada una de ellas, ya que como se describió en la **Ec. 2-14** de la sección 2.5.4.6, los resultados son 32.35 h para la sección A y 34.09 h para la sección B, mientras que el número de curvas es 88 similar para ambas subcuencas ya que cuentan con l características similares de suelo.

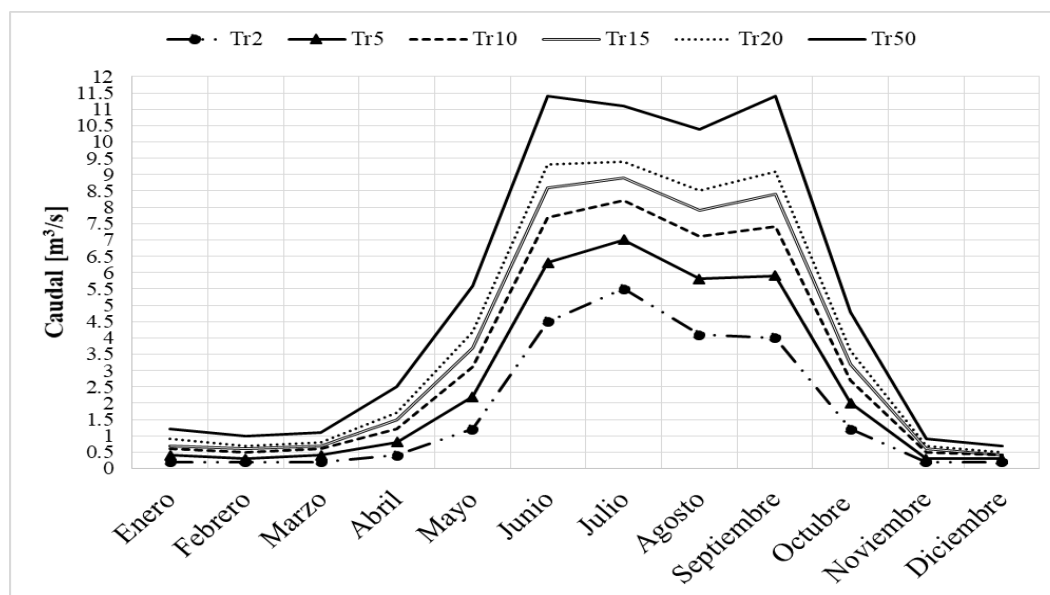
En la **Figura 53** se muestran los caudales calculados a partir de los parámetros necesarios de la subcuenca A, donde el caudal máximo en  $9.4 \text{ m}^3/\text{s}$  en el mes de Junio para un  $\text{Tr} = 50$  años. Es importante mencionar que al igual que en el método racional, el caudal va en aumento conforme el periodo de retorno aumenta. La diferencia de caudal entre periodos de retorno oscila en 0.65 veces el valor del caudal inicial, correspondiente a un  $\text{Tr} = 2$  años, sin embargo el  $\text{Tr} = 50$  años, permite tomar en cuenta el diseño y la obra de protección hidráulica en el canal. En la **Figura 53** se observa que en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Noviembre y Diciembre, se tiene un comportamiento de caudal similar entre periodos de retorno, no mostrando saltos de manera equitativa en los meses como en el caso del método racional.



**Figura 53:** Comparación de caudales para distintos periodos de retorno, de acuerdo al método SCS, sección A.

<sup>9</sup> El valor de exactitud depende del punto de comparación y tipo de estudio realizado.

En la **Figura 54** se muestran los caudales obtenidos a partir de la aplicación del método con los parámetros de la cuenca B, en este caso el escurrimiento es mayor y los caudales se encuentran en valores más elevados. La diferencia de caudales entre Tr se encuentra 0.77 veces mayor que la curva inmediata anterior de acuerdo con los Tr calculados en este trabajo. El caudal máximo se encuentra en un Tr = 50 años para el mes de Julio con un caudal de  $11.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , este caudal sirvió para realizar el cálculo de pendiente del canal propuesto, descrito en la sección 3.2. La diferencia entre caudales estimados por subcuenca, radica en alrededor de un 0.8 veces mayor el caudal de la cuenca B, por las características hídricas de la misma.



**Figura 54:** Comparación de caudales para distintos periodos de retorno, de acuerdo al método SCS, sección B.

Con lo anterior se establece que de acuerdo con las características morfométricas e hidráulicas, la diferencia de resultados obtenidos es notoria, lo que trae como consecuencia principal el sobredimensionamiento de obras y en el riesgo de componentes instalados para el aprovechamiento del río en diferentes rubros. Sirve evaluar y tener alternativas y estimación de caudales seleccionado el que se ajuste de acuerdo a las características objetivo del proyecto.

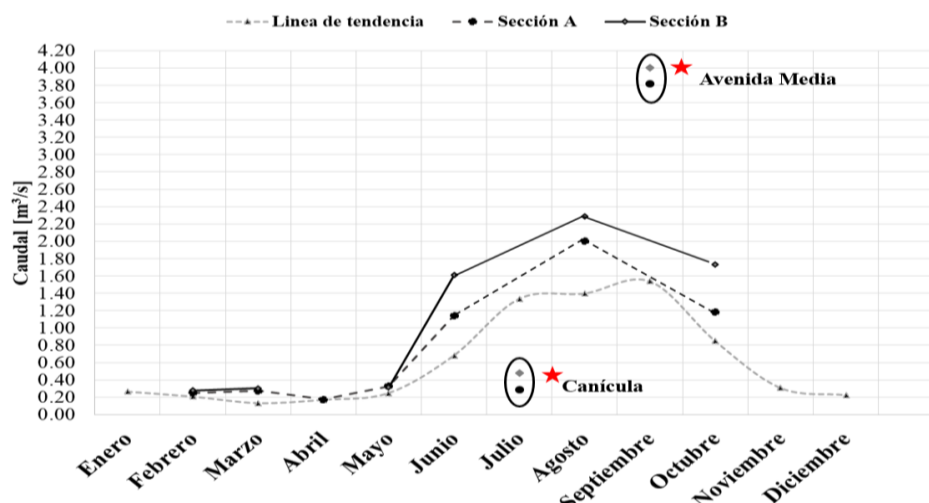
#### 3.1.4 Aforos mensuales

Derivado de las campañas de aforo en el río, se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 13**. Los datos corresponden a un aforo mensual realizado en cada una de las secciones seleccionadas. Los resultados obtenidos se encuentran dentro de la estadística de resultados establecidos en la **Tabla 12**, cuya comparación con los datos obtenidos de los aforos medios de las estaciones hidrométricas, indica un 80% de similitud en promedio. En el **Anexo 6**, se muestran los resultados generales de las variables para el cálculo.

**Tabla 13:** Resultados de aforos mensuales

Caudales resultantes de aforos mensuales [m <sup>3</sup> /s]					
Octubre (2017)	Sección A	0.907	Junio	Sección A	1.981
	Sección B	0.908		Sección B	2.61
Febrero	Sección A	0.251	Julio	Sección A	0.293
	Sección B	0.28		Sección B	0.483
Marzo	Sección A	0.275	Agosto	Sección A	2.57
	Sección B	0.303		Sección B	3.18
Abril	Sección A	0.174	Septiembre	Sección A	3.820
	Sección B	Inundado		Sección B	4.0
Mayo	Sección A	0.33	Octubre (2018)	Sección A	1.18
	Sección B	0.313		Sección B	1.73

Durante el mes de abril no fue posible aforar la sección B, ya que se encontraba inundada por la temporada de riego en la zona, haciendo imposible la asignación de datos de aforo. En la **Figura 55**, se observan los resultados de los aforos. Para los meses de Julio y Septiembre, se aprecian datos atípicos respecto a la tendencia de comportamiento del caudal del río en la zona. Esto se debe a la temporada de canícula<sup>10</sup> registrada en México del 22 de Julio al 24 de agosto aproximadamente. Por otro lado, los datos de septiembre de la avenida media<sup>11</sup>, fueron aforos realizados días posteriores a eventos de lluvias frecuentes sobre la zona de estudio. Esto incrementó el flujo en el río al momento de la realización de las mediciones. Sin embargo, el resto de los datos tiene una similitud del 80% en proporción con los caudales medios registrados por las estaciones hidrométricas.


**Figura 55:** Resultados de los aforos en sitio comparados con datos hidrométricos

<sup>10</sup> Período de sequía que ocurre durante la temporada lluviosa.

<sup>11</sup> Datos localizados dentro de la estílica, superior a los medios pero inferiores a los máximos.

### 3.1.5 Resultados de la Modelación hidráulica

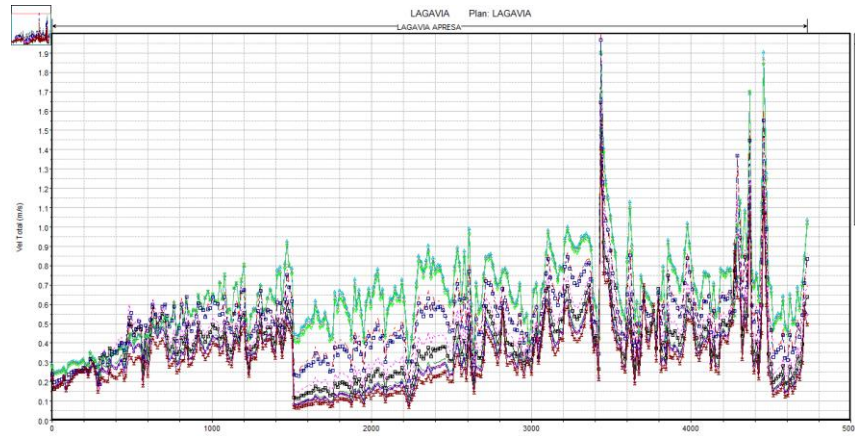
La modelación hidráulica permitió obtener y visualizar distintos parámetros calculados en la misma, esto con la finalidad de emitir juicios y conclusiones de acuerdo al tipo de estudio o el objetivo establecido. En el presente apartado, se describen los resultados obtenidos de la evaluación espacio-temporal del río, y el análisis de los gráficos respectivos para la selección de la zona que sirvió como referencia para el aprovechamiento hidráulico. Para los tres elementos analizados (velocidad, área húmeda y caudal) durante dicha selección, se generan un total de 75 gráficos, es decir 24 gráficos totales por cada elemento analizado de acuerdo a los periodos de retorno en las dos subcuencas, los dos métodos hidrometeorológicos aplicados, y tres gráficos de comportamiento de caudal de las estaciones hidrométricas.

En la **Figura 56**, con fines ilustrativos, se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de la variable de velocidad total a lo largo del río en los distintos meses. Se observa que esta tiene una tendencia de comportamiento similar con los distintos métodos de cálculo de caudales (Racional, HMS-SCS), incluyendo los diferentes periodos de retorno, que son independientes de las características de cada una de las subcuencas. Sin embargo, las velocidades presentan distintos valores dependiendo del escenario analizado, donde la variable sensible que interviene en la fluctuación de velocidad es el caudal. Estos dos primeros permitieron seleccionar se la *sección óptima* para el estudio de viabilidad del proyecto.

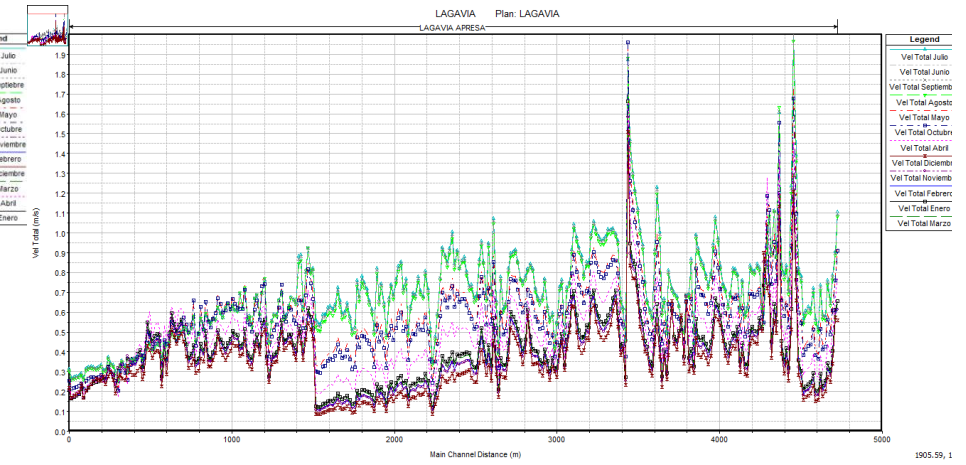
Las velocidades del cauce se pueden ver afectadas por alteraciones de fondo, por proceso de sedimentación y erosión que modifican el área no importando el método aplicado la variación de la velocidad, se mantiene en el intervalo 2-2.5 de los Tr equivalentes a 20 años.

De la Figura 53 se puede concluir que el comportamiento de tendencia de velocidad, al presentar comportamiento similar en los meses más caudalosos y en los periodos de retorno (20 y 50), oscila entre 2 a 2.5 m/s como valor máximo

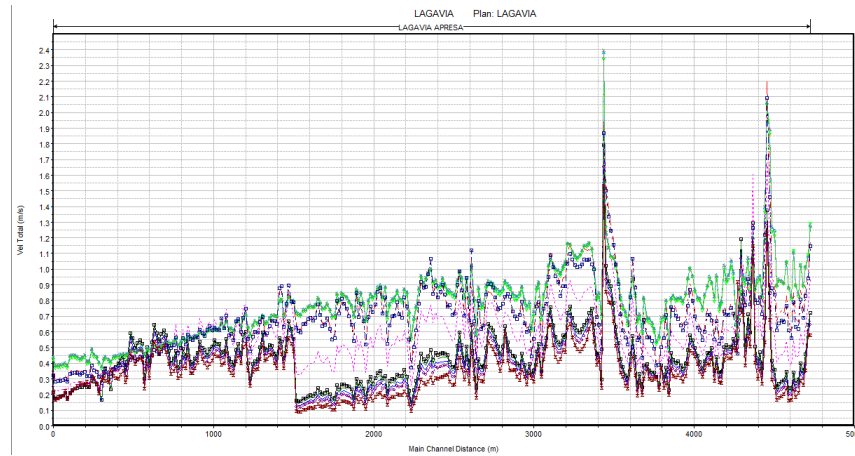




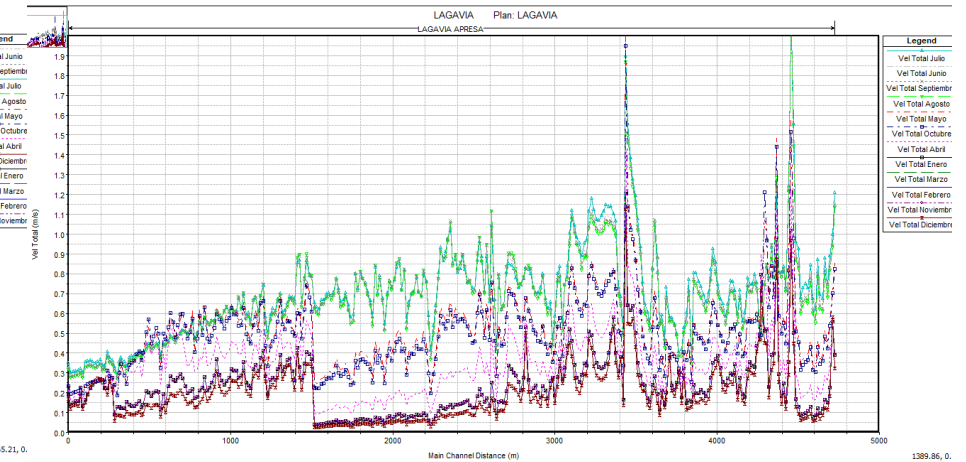
Caudales Método Racional, sección A,  $Tr=15$



Caudales Método Racional, sección B,  $Tr=20$



Caudales Método HMS-SCS, Sección A,  $Tr=50$



Caudales Método HMS-SCS, Sección B,  $Tr=5$

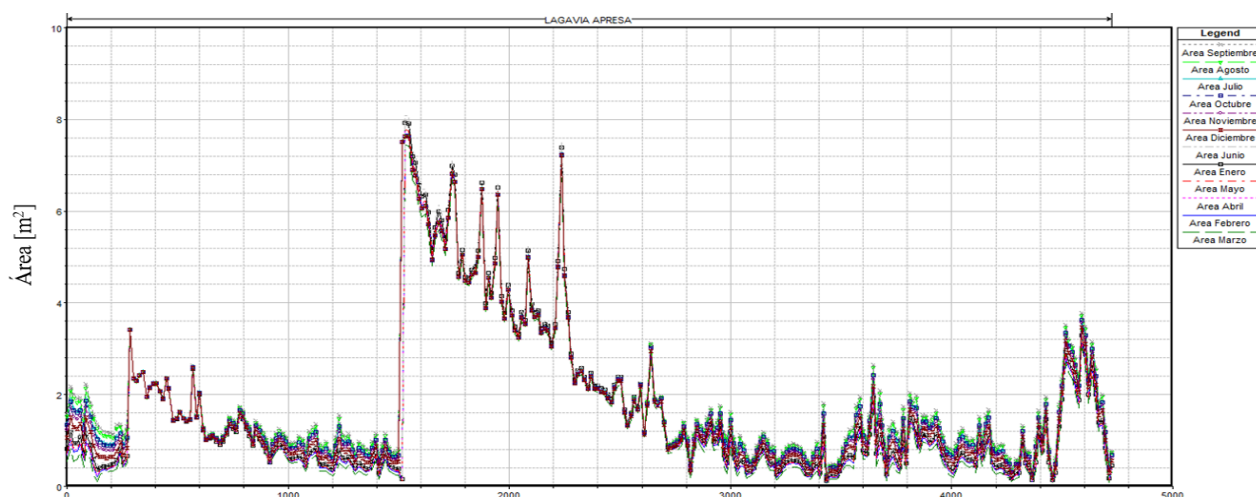
**Figura 56:** Comportamiento de velocidades, en la evaluación espacio temporal

El segundo elemento analizado fue el comportamiento del área húmeda (**Figura 57**), ya que con esta se determinaron zonas inundadas a lo largo del año. Esto con el propósito de identificar los puntos donde se tiene mayor disponibilidad del recurso. Al realizar el contraste con la zona de mayor velocidad, la cual es primordial para la generación eléctrica, se determinó si es un área húmeda de tipo suspendida o área húmeda fluyente.

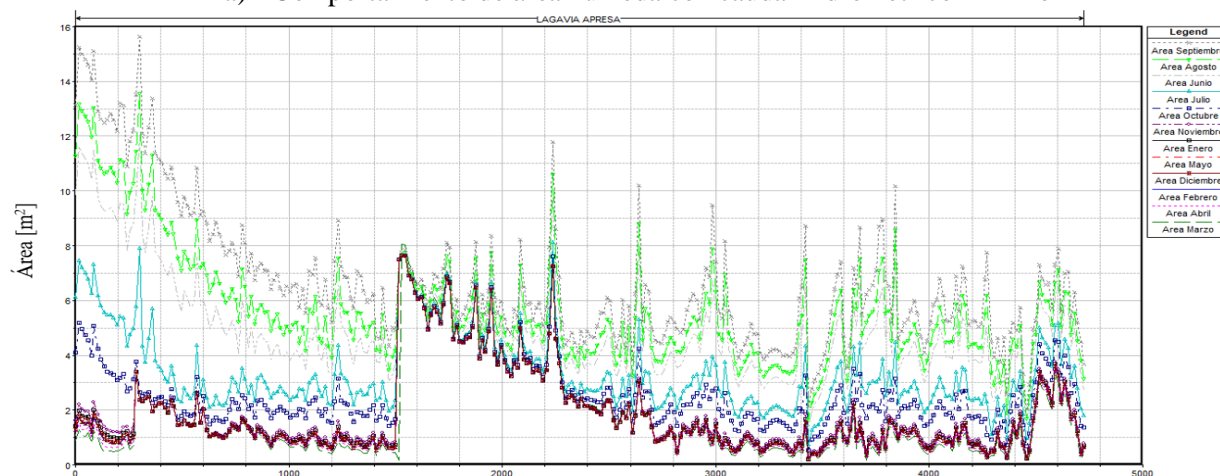
En el análisis de área húmeda, se identificó que las zonas ubicadas de 0 a 2500 m aguas arriba de la presa, presentan una gran área de inundación a lo largo del año. Sin embargo, no se tiene una velocidad de rango considerable a lo largo de los periodos de retorno, donde esta aumente en función del caudal.

En los caudales históricos o actuales (estación hidrométrica), se observan velocidades con magnitudes cercanas a cero, lo que indica que dichas áreas se encuentran inundadas la mayor parte del año. Este comportamiento se ratifica en la **Figura 57 a**, donde al tener un comportamiento de caudal muy bajo el área resulta influyente pero la velocidad disminuye. Este fenómeno sucede por el uso principal que se le da al río, que es para riego de temporal, donde los pobladores realizan el cierre de la compuerta de la presa para lograr dicho efecto. Mientras que en temporada de avenidas el agua sube hasta dichas zonas y de esta manera se mantienen inundadas.

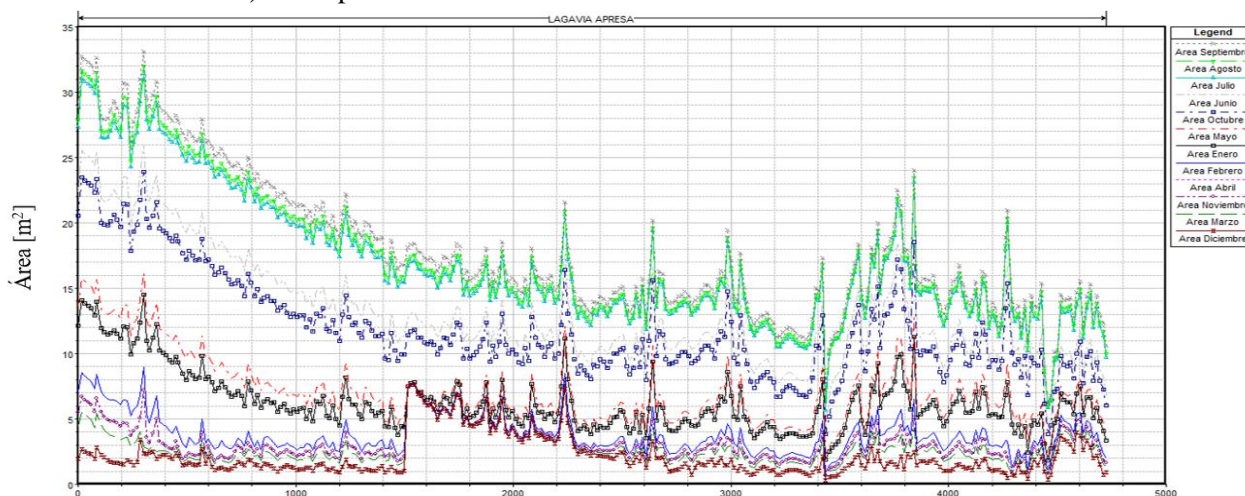
En la **Figura 57** se muestra el comportamiento de área húmeda al igual que los otros factores analizados, muestra una línea de tendencia de funcionamiento e interacción similar, es decir, el comportamiento se conserva oscilando únicamente entre nuevos valores dependiendo del caudal que se presente en la misma.



a) Comportamiento de área húmeda con caudal hidrométrico mínimo



b) Comportamiento de área húmeda con caudal hidrométrico medio

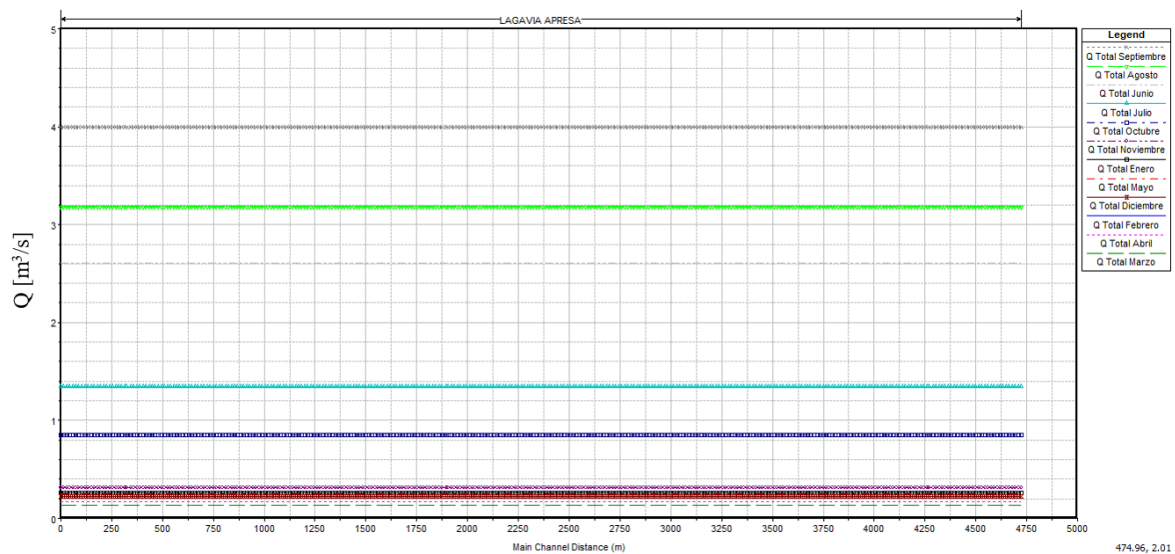


c) Comportamiento de área húmeda con caudal hidrométrico medio

**Figura 57:** Comportamiento de áreas húmedas en la evaluación espacio-temporal

El tercer parámetro analizado fue el caudal, el cual muestra que de acuerdo con el incremento de los periodos de retorno este también tiende a aumentar. Sin embargo, por distintas causas el comportamiento no es constante ni predecible. Las variables no controlables como son el aumento de temperaturas y los índices mayores de evaporación de agua pueden ocasionar una disminución en el caudal, o mantenerlo y no considerar un incremento del mismo. El comportamiento del caudal es similar en los distintos periodos de retorno respecto a las secciones de río y de las características de cuencas analizadas para la aplicación.

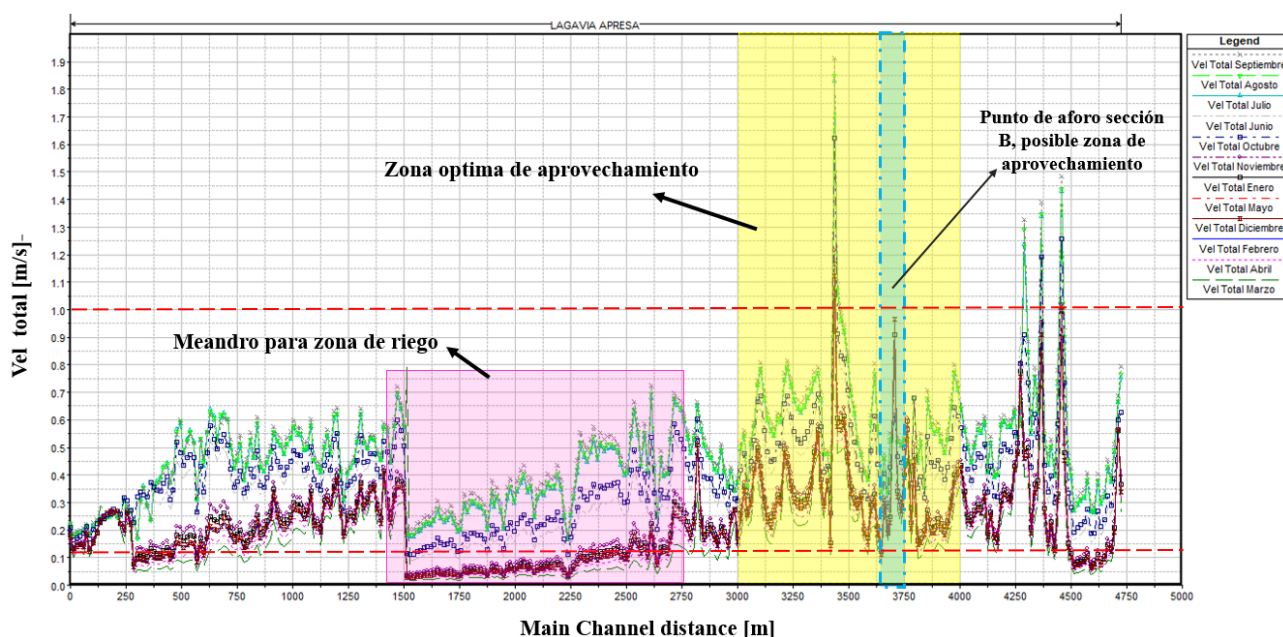
Es importante tener un control del caudal, ya que este se asocia directamente a las velocidades analizadas. El análisis respectivo del caudal fue más sencillo llevarlo a cabo sobre los escenarios planteados en la aplicación de los métodos teóricos, y en los obtenidos a partir de aforos, así como del respectivo análisis de las estaciones hidrométricas. En la **Figura 58** se observa el comportamiento del caudal hidrométrico medio en la sección. Para fines de visualización del mismo, los gráficos que auxiliaron al análisis, son los descritos en secciones anteriores.



**Figura 58:** Comportamiento de caudal en la zona [Caudal hidrométrico medio]

El análisis general realizado, permitió determinar las secciones con potencial de aprovechamiento hidráulico. En la **Figura 59** se observa que las secciones con mayor potencial, se encuentran en un intervalo uniforme de un kilómetro, ubicadas a partir de tres kilómetros aguas arriba de la presa. La figura es tomada a partir de la modelación de la variación con los caudales medios hidrométricos, con fines ilustrativos de comportamiento de velocidad, pues como se mencionó anteriormente esta tiene un comportamiento similar en distintos escenarios de caudal.





**Figura 59:** Comportamiento de velocidad y zonas de aprovechamiento, de acuerdo a la modelación con caudales medios hidrométricos

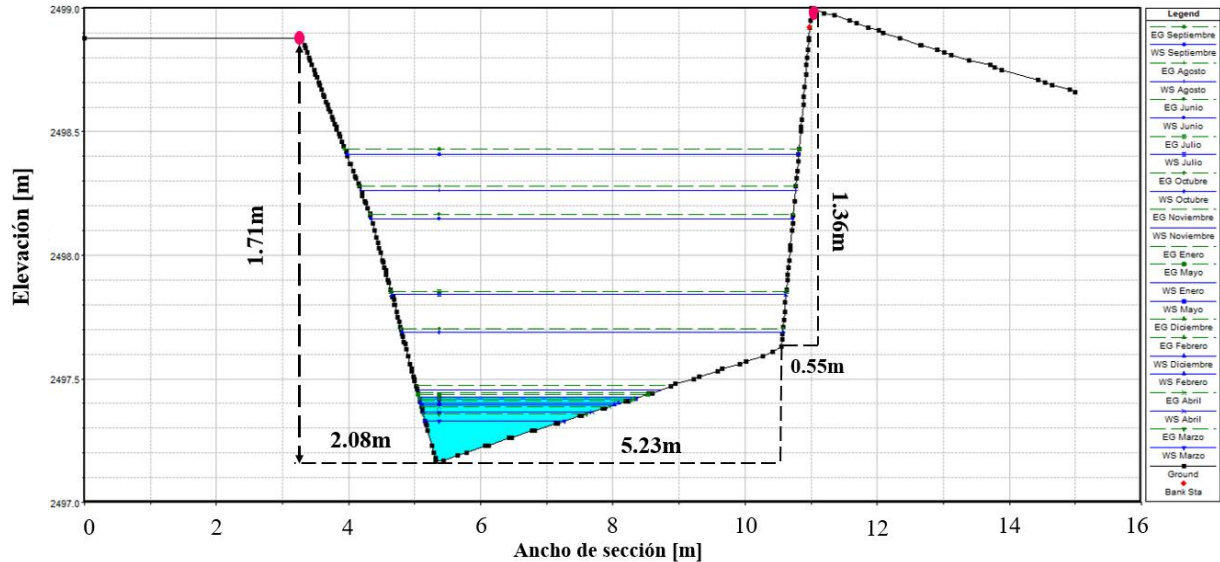
Dentro del intervalo establecido se determinó que la sección para el aprovechamiento óptimo, de acuerdo a las características geográficas de la misma, se encuentra dentro de 0.5 km en uniformidad de comportamiento, es decir en un intervalo de velocidad de 0.1- 1 m/s, ubicado a 3.5 kilómetros aguas arriba de la presa, como se muestra en la parte entintada de color azul en la **Figura 59**, donde la zona específica del rango es la número 3720 de acuerdo al cadenamiento que muestra el software HEC-RAS. Es decir, la equivalente a 3.72 km aguas arriba de la presa, justo en la ubicación del puente denominado “Benito Juárez” alledaño a la comunidad del mismo nombre. Cabe mencionar que la zona entintada de color rosado es un meandro<sup>12</sup> generados para riego durante la mayor parte del año destacando el comportamiento de flujo a baja y nula velocidad, pero con una gran área húmeda.

La zona se ha considerado conjuntamente como propia de acuerdo ya que de acuerdo al criterio social, esta se encuentra en la entrada a la comunidad “Benito Juárez” y aproximadamente a 200m de la misma se encuentra la iglesia y el comedor comunitario de la localidad, así como las principales líneas de interconexión de energía eléctrica, por lo que esto facilitará el trabajo de interconexión y distribución de energía.

<sup>12</sup> Curva descrita por el curso de un río, cuya sinuosidad es pronunciada y baja pendiente

### 3.2 ESTIMACIÓN DE ENERGÍA Y POTENCIA EN LOS DISTINTOS ESCENARIOS

Una vez determinada la sección específica para el análisis, se prosiguió a la observación detallada del comportamiento hidráulico de la misma. Se analizaron velocidades, áreas, húmedas y tirantes dentro de la misma a lo largo del año, así como su comportamiento ante los distintos escenarios calculados teóricamente, incluyendo las características geométricas, es decir alto de hombros y ancho de sección (*Figura 60*).



**Figura 60:** Sección analizada, características geométricas

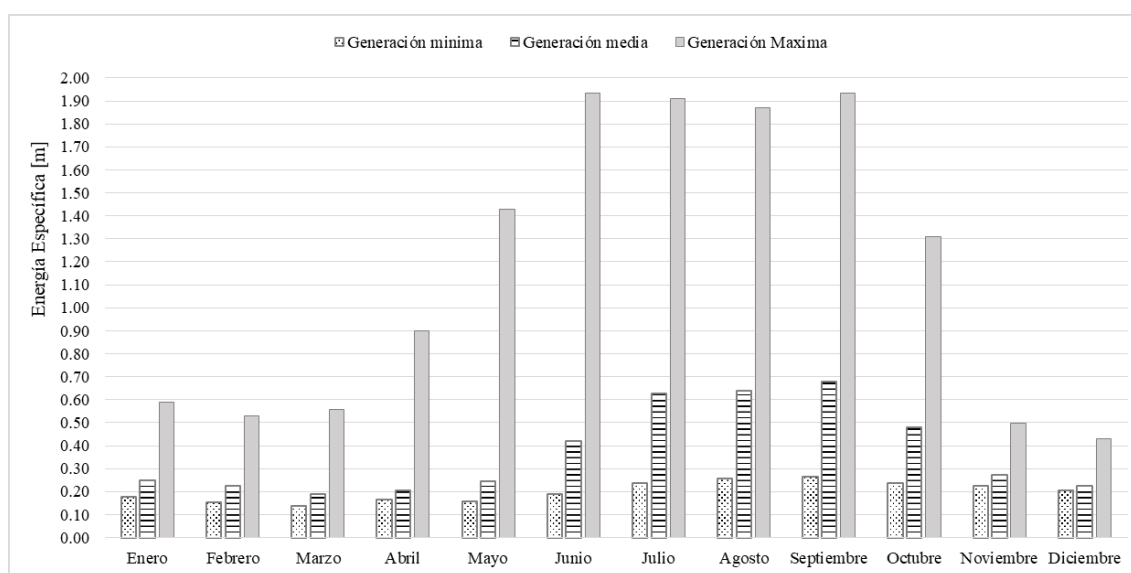
A partir del análisis de los elementos mencionados, cuyos valores son aproximados de la forma mostrada en la **Tabla 14** por el software de modelación, para cada escenario se obtuvieron las variables necesarias para realizar el cálculo de energía y potencia aprovechable del flujo. Esta última se estimó con la finalidad de comprender la energía máxima o mínima extraíble, y con la finalidad de realizar una comparación de estimación a partir de los métodos teóricos. De este modo dar un informe de viabilidad energética del sitio seleccionado. En el **Anexo 7** se observan las variables numéricas para el cálculo de energía y potencia, a partir de las ecuaciones **Ec. 2-16**, mientras que con fines de comparación se tomó en cuenta la ecuación **Ec. 2-17**, para de esta forma obtener los resultados en unidades más representativas.

**Tabla 14:** Resultados del escenario de modelación a partir de caudales mínimos de la estación hidrométrica

Mes	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Elevación mínima [m]	Elevación máx [m]	Crit.W.s	E.G. Elev [m]	Pendiente	Vel.flujo [m/s]	Área mojada [m <sup>2</sup> ]	Top Width	Froude
Enero	0.11	2497.17	2497.31	2497.31	2497.35	0.024971	0.89	0.13	1.80	1.06
Febrero	0.09	2497.17	2497.29	2497.29	2497.33	0.023325	0.80	0.11	1.65	1.01
Marzo	0.06	2497.17	2497.28	2497.28	2497.30	0.024224	0.75	0.08	1.42	1.00
Abril	0.09	2497.17	2497.3	2497.30	2497.33	0.023105	0.81	0.11	1.69	1.01
Mayo	0.09	2497.17	2497.3	2497.30	2497.33	0.022343	0.81	0.12	1.72	0.99
Junio	0.13	2497.17	2497.32	2497.32	2497.36	0.021429	0.87	0.15	1.95	1.00
Julio	0.24	2497.17	2497.36	2497.36	2497.41	0.019599	0.97	0.25	2.52	0.99
Agosto	0.29	2497.17	2497.39	S/N	2497.43	0.012100	0.85	0.34	2.92	0.80
Septiembre	0.3	2497.17	2497.40	S/N	2497.44	0.010903	0.83	0.37	3.03	0.76
Octubre	0.24	2497.17	2497.36	2497.36	2497.41	0.018488	0.95	0.25	2.53	0.96
Noviembre	0.21	2497.17	2497.35	2497.35	2497.40	0.020047	0.95	0.22	2.36	0.99
Diciembre	0.17	2497.17	2497.33	2497.33	2497.38	0.023390	0.95	0.18	2.13	1.05

### 3.2.1 Resultados de energía y potencia para datos de las estaciones hidrométricas

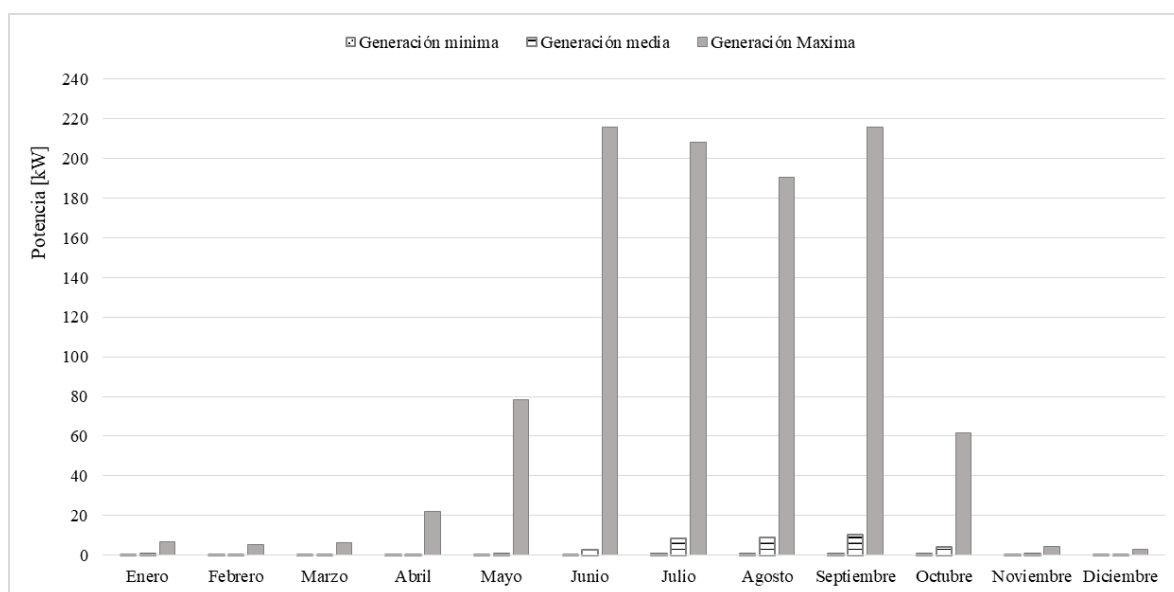
En la **Figura 61** se observan los resultados obtenidos de energía específica, a partir de la modelación con caudales hidrométricos mínimos, medios y máximos, pudiéndose observar que la energía aumenta en proporción del caudal. Es por ello que con los caudales máximos registrados se tiene una cantidad mayor de energía, principalmente para los meses de junio a septiembre cuyo valor es aproximadamente de 1.90 m de energía específica. Mientras que con los caudales medios se observa una energía máxima de casi 0.7 m para el mes de Septiembre. Por otra parte, con los caudales mínimos se tiene una diferencia de energías entre ellos de 33% en los distintos meses. Es importante mencionar que los caudales mínimos y máximos tienen una probabilidad menor de ocurrencia.

**Figura 61:** Energía específica de acuerdo a los caudales hidrométricos, mínimos, medios y máximos.



Con el valor de la energía específica y aplicando la ecuación antes citada, se obtuvo la cuantificación de la potencia neta. La **Figura 62** muestra el comportamiento de esta variable con respecto al flujo, que aumenta en proporción a los caudales más altos. Los caudales medios y mínimos, en comparación con los escenarios máximos, no son representativos. Es importante mencionar que dichos cálculos fueron realizados a partir de flujo libre en el río, es decir, sin la implementación de alguna obra para acelerar el flujo y tener mayor potencia extraíble.

La potencia máxima registrada para el modelado en generación máxima fue de 218 kW aproximadamente, mientras que para generación media es equivalente a apenas 8.2 kW ambas para el mes de julio observándose una notoria diferencia de aproximadamente 200 kW. Sin embargo, al encontrarse en dicho rango permite dar una estimación del máximo potencial extraíble en un escenario de operación actual.



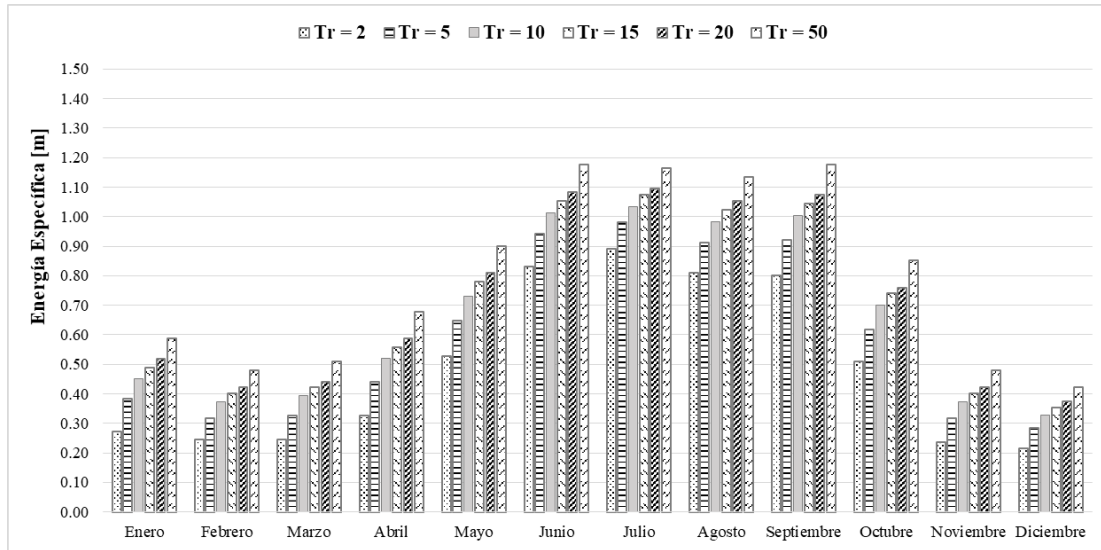
**Figura 62:** Potencia a partir de caudales mínimos, medios y máximos hidrométricos

### 3.2.2 Resultados de energía y potencia para datos obtenidos del método racional

Dado que el caudal es un factor importante en el comportamiento de la energía, en los meses más lluviosos se presentan energías más altas, mientras que conforme este se va acercando a los meses de estiaje va disminuyendo, sin embargo, se mantiene el comportamiento deseado, es decir con un comportamiento velocidad constante a lo largo del año.

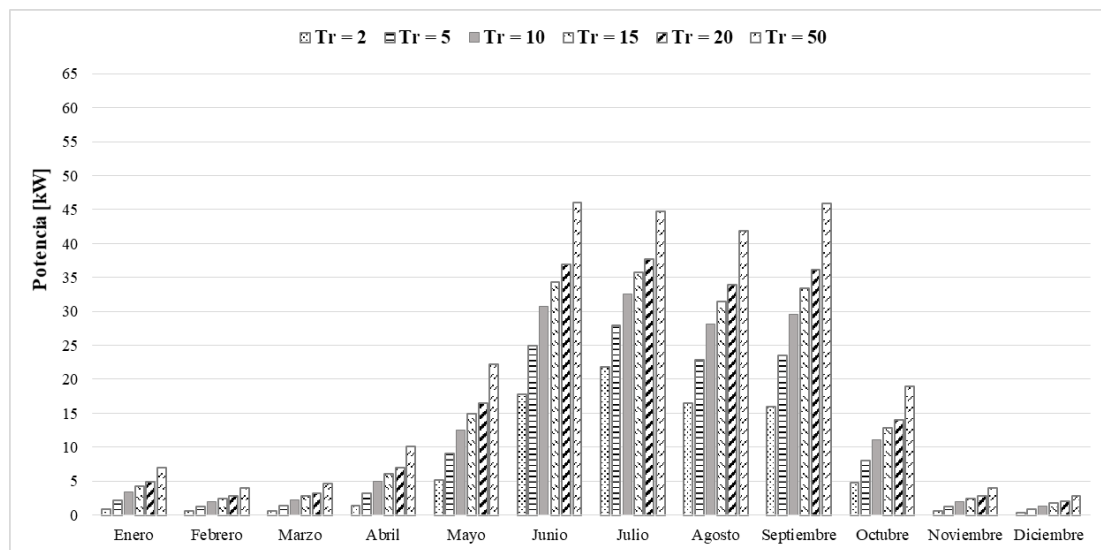
El método racional, como se mencionó en apartados anteriores subestimó los caudales en comparación con el método HMS, pero los mantuvo dentro del intervalo del caudal previamente establecido. Es decir, los caudales estimados a partir del método racional se encuentran dentro del rango de los caudales aforados in situ, así como de los caudales registrados por las estaciones hidrométricas. Sin embargo, debajo de las avenidas máximas (**Figura 63**) se observa el comportamiento de la energía específica. Esta aumenta cuando se incrementan los periodos de retorno y los caudales, por lo que la energía máxima de comportamiento estimada se encuentra en el periodo de retorno más alto. Dicho comportamiento podría resumirse, estableciendo que conforme el tiempo pase, el flujo tendrá mayor energía potencial extraíble. El caso de la sección A cuenta con una energía promedio en los meses lluviosos de 1.18 m aproximadamente para un  $Tr = 50$ , y con una energía oscilante en los periodos de retorno de 2 a 20 años

entre 0.20 m hasta 1.10 m, respectivamente, es decir un aumento entre periodos de retorno alrededor del 30% con respecto al anterior.



**Figura 63:** Energía específica, Método racional sección A

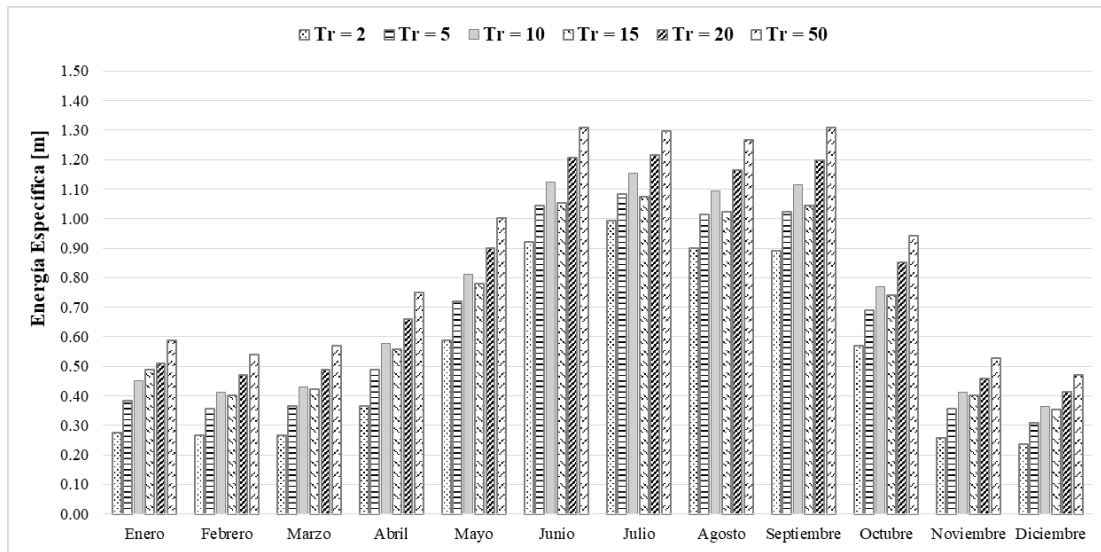
Con el comportamiento descrito de la energía específica, se realizó la transformación de unidades pertinentes a potencia [kW]. Esto con el fin de aproximar el comportamiento del flujo y el comportamiento de cada uno de los métodos, así como de la influencia de las variables distintas entre cada subcuencia. En **Figura 64** se observa el grafico de potencia, en la que se puede apreciar que la diferencia de energías se hace más notoria conforme los periodos de retorno adquieren valores más altos. Adicionalmente, se observa que el comportamiento resulta muy uniforme, mostrando picos en los meses lluviosos, con una diferencia de hasta 30 kW en un periodo de retorno de 20 años. Este valor resulta significativo y abre la pauta al diseño de obra de toma, para que la diferencia no sea tan grande entre meses de lluvia y estiaje. La sección A tiene un máximo de 30 kW, calculados para un periodo de retorno de 20 años en el mes de Julio, y un mínimo de 5 kW en el mismo periodo pero en el mes de Diciembre, siendo este el mes con el menor valor.



**Figura 64:** Potencia para los caudales modelados, Método racional Sección A

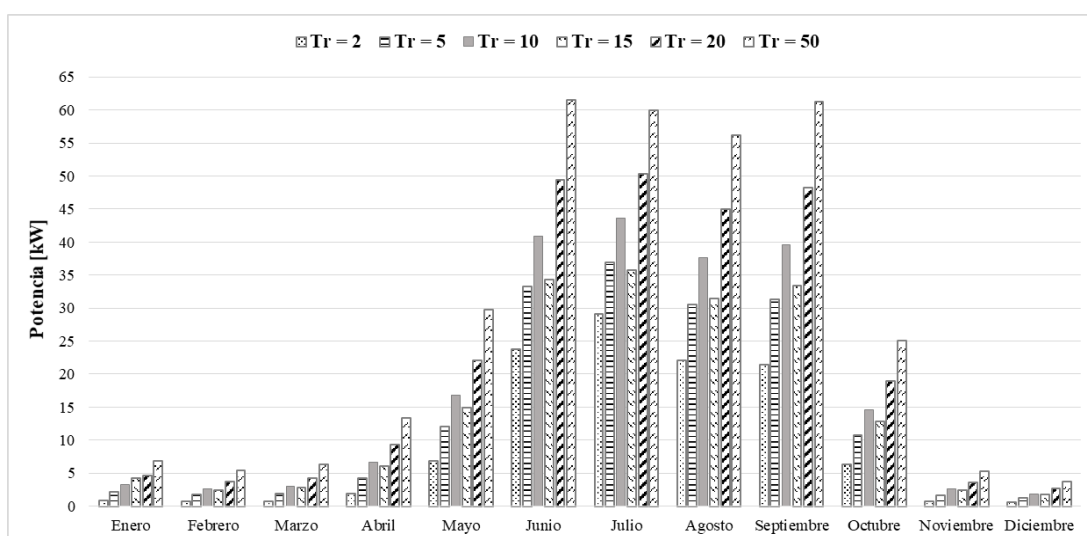
Para el caso de la subcuenca B y los respectivos valores de energía obtenidos con los caudales del método racional, la **Figura 65** expone la comparación entre los diferentes periodos de retorno. En comparación, la **Figura 63** muestra energías más altas, esto debido al comportamiento del caudal, que como se mencionó en secciones anteriores, tiene un mayor escurrimiento en la zona, por tanto, con dichos resultados se presenta un comportamiento en tendencia similar pero con valores más altos.

Se observa que el comportamiento es más uniforme entre energías específicas calculadas para cada periodo de retorno, con una diferencia de un 25% en aumento con respecto al periodo anterior de cada uno de ellos. Esta diferencia es más notoria en el cálculo de potencia, donde se observan incrementos más grandes entre meses lluviosos y meses de estiaje. Se tiene una energía máxima registrada para este método de 1.30 m en la sección B durante el mes de Julio con un  $Tr = 20$ , es decir 9.5% de diferencia con respecto a la sección A. Los valores de energía oscilan entre un 0.30 a 1.30 m con respecto a los periodos de retorno de 2 a 20 años.



**Figura 65:** Energía específica, Método racional sección B

Para el caso de la potencia calculada a partir de lo anterior, se observa un comportamiento más uniforme entre los periodos de retorno de 2 a 20 años, en los que la potencia oscila entre 5 kW y 50 kW, por lo que los valores arrojados a partir del cálculo de energía con las características de la subcuenca B es mayor, esto último con respecto a la subcuenca A. Sin embargo, dado el valor de los caudales, la generación a flujo libre del cauce continua siendo baja. La diferencia de potencia entre cada periodo de retorno oscila entre un 20% a un 30% respecto uno del otro.

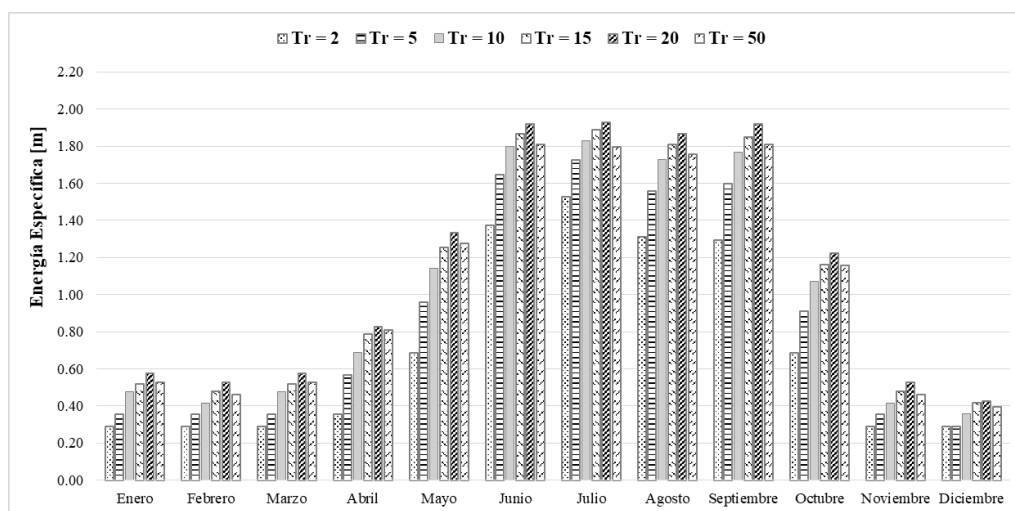


**Figura 66:** Potencia para los caudales modelados, Método racional Sección B

El método racional permitió dar un primer acercamiento a la viabilidad energética de aprovechamiento del flujo. Se observó que de acuerdo con las características y a la ubicación de la zona de estudio, resulta mejor tomar en cuenta los valores calculados a partir de la sección B, y no los valores previamente dados como resultado en el análisis de sección A, ya que existe una diferencia de 25 kW aproximadamente entre picos de energía para el mes de Julio con un  $Tr = 20$  entre sección. De tal forma que si se toma en cuenta la sección A, se estaría subestimando la energía máxima aprovechable del flujo.

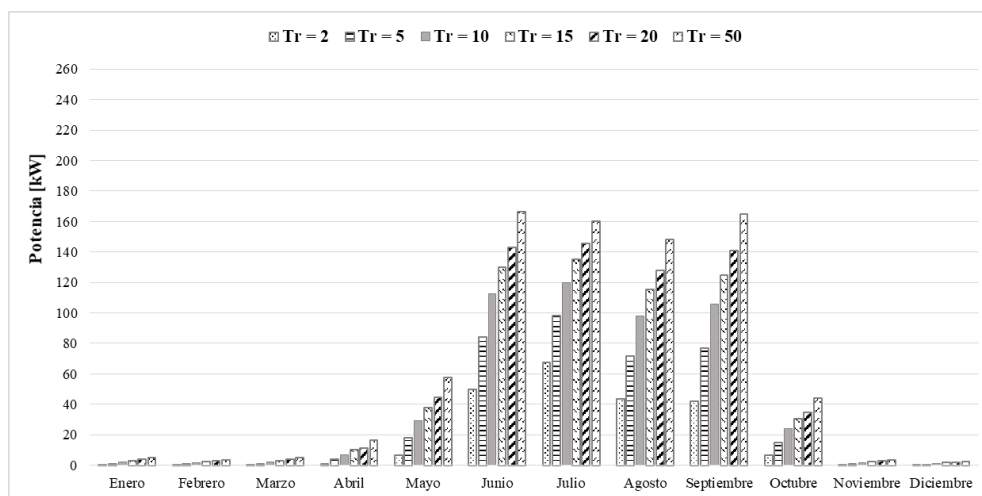
### 3.2.3 Resultados de energía y potencia para datos obtenidos del método HMS-SCS

En los apartados anteriores se ha mencionado que el método HMS-SCS sobreestima los caudales, lo que se observa directamente en el cálculo de energía y potencia expuesto en la **Figura 67**. Para este caso la energía específica oscila en valores entre 0.20 a 1.90 m para el intervalo de periodos de retorno de 2 a 20 años, con un aumento entre cada periodo del 20% aproximadamente. Con respecto a cada periodo de retorno calculado, se tiene el mayor pico en un  $Tr = 20$  para el mes de Julio equivalente a 1.90m. En el caso de la energía calculada en la sección A, los meses con menor energía extraíble son Noviembre y Enero.



**Figura 67:** Energía específica, Método HMS-SCS sección A

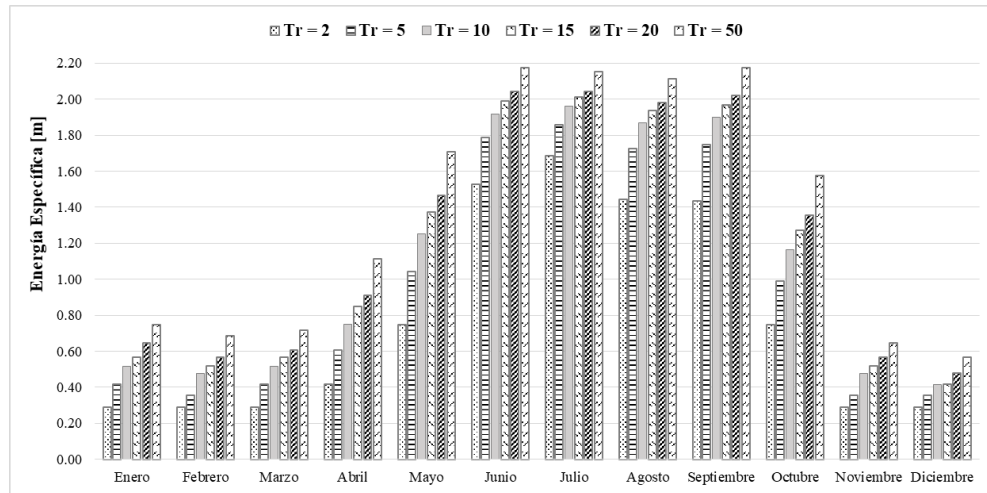
La potencia calculada a partir de lo anterior, mostrada en la **Figura 68**, es mínima en los meses de Noviembre y Diciembre, a diferencia de los meses de Junio a Septiembre, donde se observa un pico en Julio con alrededor de 165 kW. Por lo que la diferencia es desde 5 kW como mínimo hasta 165 kW como máximo, en un solo periodo de retorno. Es decir, que con este método se compromete mucha energía por la diferencia de caudales. Esto se debe principalmente a lo descrito en la sección 3.1.3.2, al mostrar una energía tan baja en los meses de estiaje, resulta difícil dar viabilidad al aprovechamiento. El comportamiento de energía entre cada periodo de retorno, va en un aumento aproximado al 30%, pero la diferencia entre meses de estiaje a los de avenidas es 160 veces mayor.



**Figura 68:** Potencia para los caudales modelados, Método HMS-SCS Sección A

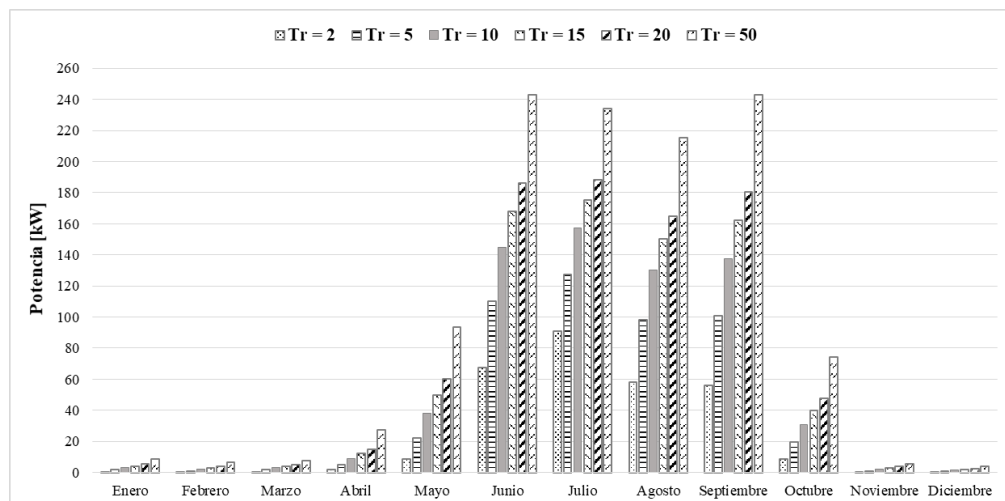
En el caso de la energía específica calculada para la sección B, mostrada en la **Figura 69**, se tiene un comportamiento constante y uniforme. La diferencia radica en un 35% respecto a cada periodo de retorno y para los periodos de 15 a 20 años dicha diferencia disminuye. Observando el mismo gráfico, el comportamiento es similar con una diferencia del 4 a 5 % entre cada una de ellas. Para este caso la energía oscila entre 0.4 a 2.2 m en un  $Tr = 20$  años, por lo que esta diferencia se marca aún más en el cálculo de

potencia. Los meses con menor energía aprovechable son Noviembre y Diciembre mientras que los meses con mayor potencial de aprovechamiento son Julio a Septiembre, con una ligera disminución en agosto, donde conforme el aumento de los periodos de retorno esta se restablece.



**Figura 69:** Energía específica, Método HMS-SCS sección B

Para el caso de la potencia (**Figura 70**), de igual forma que en la sección A, la diferencia entre meses lluviosos y de estiaje es notoria mostrando un pico para un  $Tr = 20$  en el mes de Julio equivalente a 180 kW. Mientras que para Diciembre apenas alcanza para el mismo periodo de retorno un valor igual a 4 kW. A diferencia de la sección A, se observa una mayor potencia aprovechable superior en 20 kW, es decir, un 18% de diferencia. Con esto se establece que no se compromete la energía utilizando los datos de la sección B.



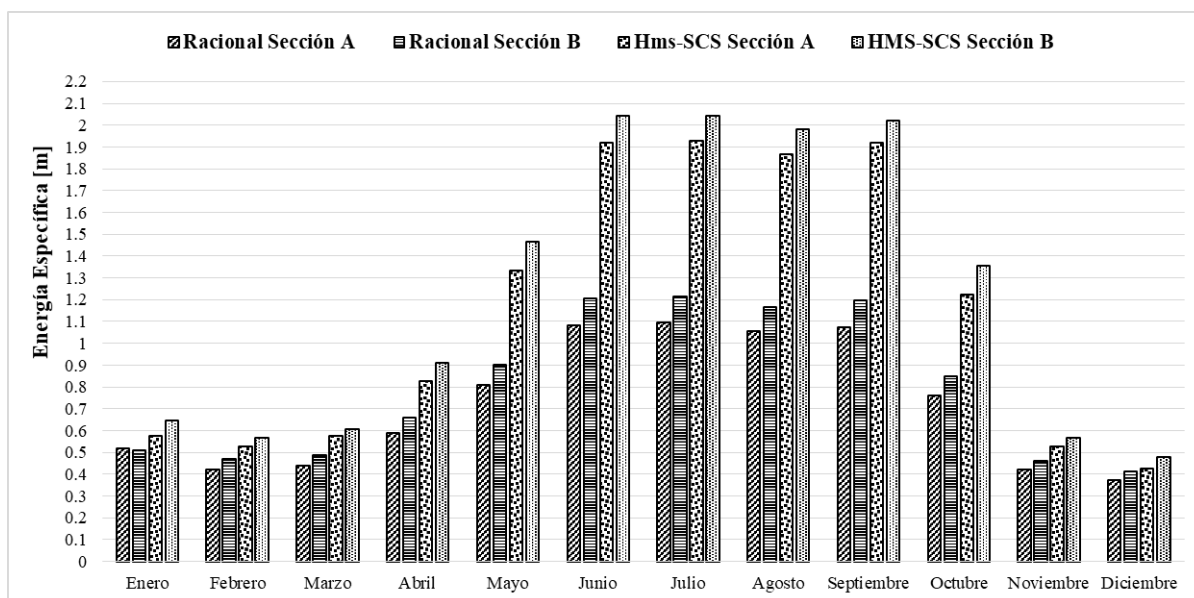
**Figura 70:** Potencia para los caudales modelados, Método HMS-SCS Sección B

El método HMS-SCS para el cálculo de energía y potencia tiene un punto débil, el cual al subestimar los caudales en los meses de estiaje, disminuye los resultados de los factores anteriormente mencionados, y compromete mucha energía entre los diferentes periodos de retorno. Esto se puede observar en el comportamiento de un  $Tr = 20$  y un  $Tr = 50$  años, lo que podría arrastrar distintos errores de cálculo y de subdimensionamiento, para cualquier tipo de aprovechamiento energético.

### 3.2.4 Comparación de métodos para la estimación de viabilidad energética

Con la finalidad realizar una comparación más específica a los métodos utilizados, se graficaron los resultados para un  $Tr = 20$  respecto a cada uno de ellos y a las subcuencas utilizadas. En la **Figura 71** se observa que el método SCS, compromete una mayor energía, con respecto al mes de Julio del método racional. Se tiene una diferencia de 0.80 unidades mayor. Sin embargo, en los meses de estiaje el comportamiento no es muy distinto, dado que los valores tienen diferencias entre 0.3 a 0.5 unidades entre sí. Con esto, el método SCS muestra una subestimación en dichos meses, mientras que el método racional conserva un comportamiento más uniforme.

Ambos métodos ratifican que las mejores características energéticas son los valores obtenidos de la sección B, resultando en aproximaciones más estables y apegadas a los valores medios hidrométricos. Entre métodos existen diferencias de alrededor de un 15%, esto entre valores estimados para meses lluviosos.

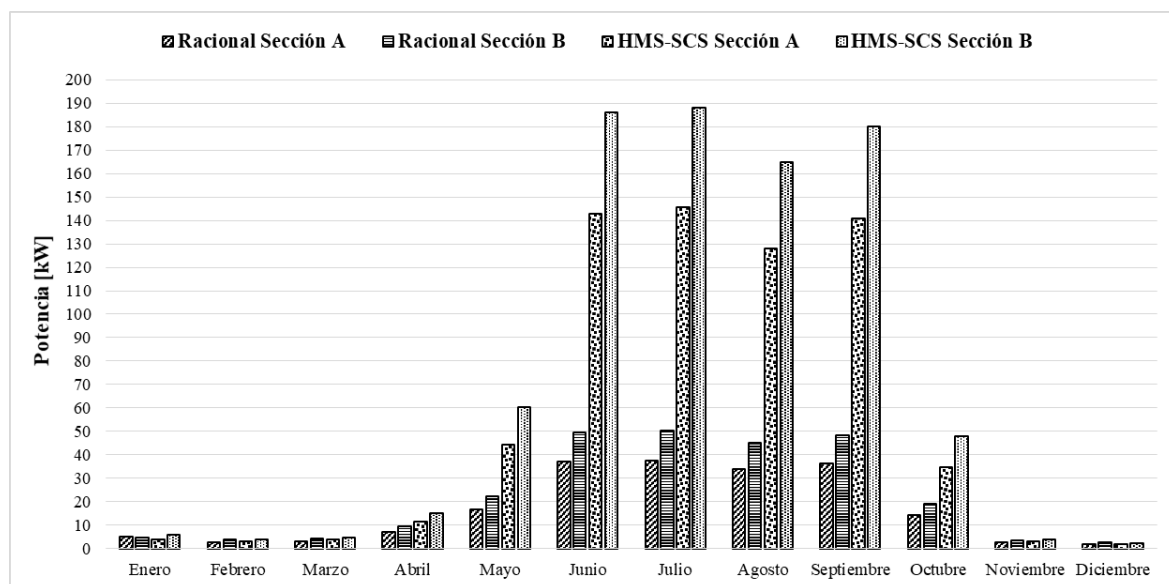


**Figura 71:** Energía específica, comparación de métodos de estimación de caudal para  $Tr=20$  años

En la **Figura 72** se observa el cálculo de potencia con la información anterior, haciendo que la potencia estimada a partir del método SCS-HMS modifique la escala de visualización. Este método compromete mucha energía, ya que el pico máximo del método Racional en el periodo de retorno  $Tr = 20$  años, se encuentra en 50 kW para el mes de Julio; mientras que con el SCS se concentra en 185kW, es decir, una diferencia de 135kW, lo que significa un 70% más que utilizando el método SCS.



Cabe mencionar que son aproximaciones y escenarios favorables y desfavorables, para considerar o no, en el cálculo la elección de turbina. En este trabajo, ambos resultados abrieron pauta para la verificación y análisis del diseño.



**Figura 72:** Potencia, Comparación de Métodos de estimación de caudal para  $Tr=20$  años

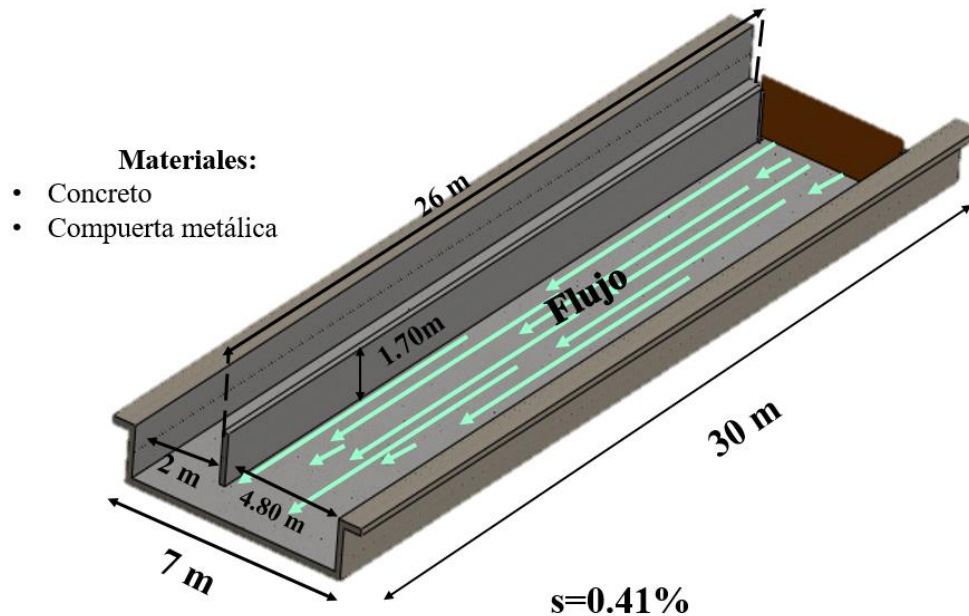
### 3.3 RESULTADOS DE DIMENSIONAMIENTO DE OBRA DE TOMA Y MODELACIÓN 3D.

A continuación se describen los resultados obtenidos del análisis y dimensionamiento de la obra de toma a partir de los resultados expuestos en la sección 3.1, así como el análisis de la misma con el software de modelación 3D para dar viabilidad de funcionamiento hidráulico de obra. Con el análisis se determinaron las características de la turbina para instalar en el canal de generación.

Se muestran y describen los gráficos correspondientes a la energía de flujo usada para el dimensionamiento y comportamiento del canal, así como los planos para su construcción. En la parte de modelación 3D se describen detalladamente las mejoras realizadas a los primeros planteamientos de la obra de toma.

#### 3.3.1 Canal de generación y caudales ecológicos.

Como se ha descrito en apartados anteriores, la obra de toma está planteada por dos canales paralelos, uno que servirá para la ubicación de la turbina y otro para desfogue y los caudales ecológicos y avenidas máximas. El funcionamiento del canal será controlado mediante la instalación de dos compuertas planas de tipo deslizante apoyadas por rieles instaladas en el canal de desfogue. En el **Anexo 8** se observa el plano con las correspondientes características geométricas de los canales que conforman la obra de toma, y en la **Figura 73** se observa la caracterización de dicha obra.



**Figura 73:** Vista isométrica de los canales para la sección.

Es importante mencionar que una vez determinadas las dimensiones de ancho de sección del canal<sup>13</sup>, la propuesta inicial para la longitud fue de 15m, mientras que con el análisis 3D se determinó que la longitud óptima fue de 30m. Esto con el fin de mantener un flujo homogéneo completamente desarrollado. El muro inicialmente tenía la misma longitud que el canal. Sin embargo por el comportamiento de flujo en la transición del río al canal, y la división del mismo en la compuerta presentó una alteración en las velocidades del mismo, ocasionando zonas turbulentas y recirculación del flujo cercano al muro, resultando insuficiente el largo del canal inicial. Por lo que en el análisis de flujo a partir del canal, se determinó que fue necesario reducir el muro en la zona de la compuerta y la salida del canal, dando como resultado final la geometría mostrada en la figura anterior.

### 3.3.1.1 Análisis del canal a flujo crítico Resultado de diseño a flujo critico

En la sección 2.7 se describió el proceso para el diseño y análisis del flujo sobre el canal bajo condiciones de flujo crítico, obteniéndose así el comportamiento energético del mismo, bajo un ancho equivalente a 2 m. Con los caudales mensuales ecológicos aprovechables, se asignaron distintos valores de tirante para obtener la energía específica.

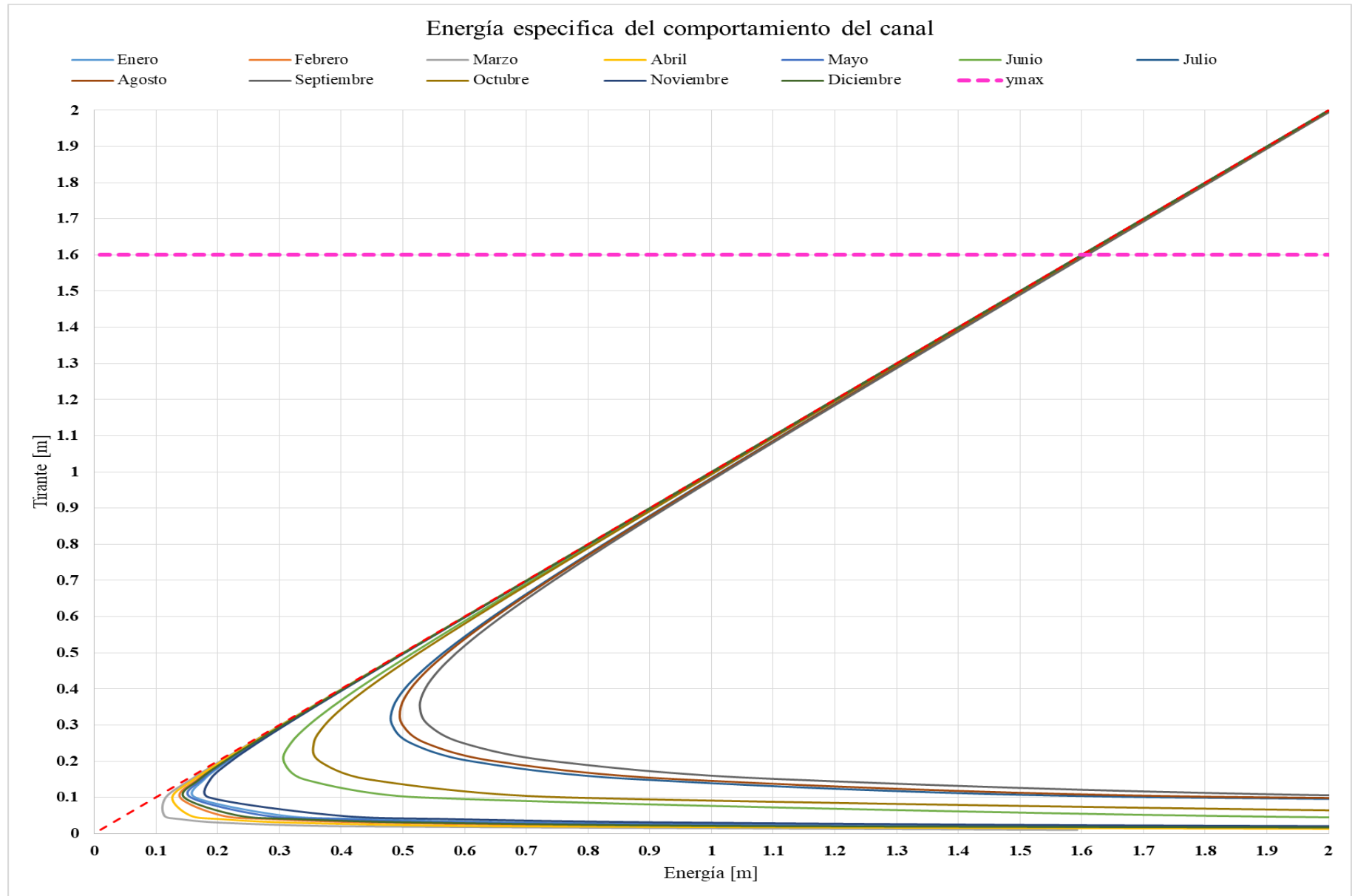
En la **Figura 74**, se observa el comportamiento de energía en el canal. Se muestra que conforme el caudal aumenta se tiene un comportamiento de energía mínima mayor, principalmente en los meses de Julio, Agosto y Septiembre, en un intervalo de energía mínima de 0.481-0.528 m. Estos valores aumentan junto con el tirante, observándose un comportamiento semejante en el resto del año, que tiende a una energía equivalente sin importar la geometría del canal. En el tirante máximo permisible del canal de 1.6 m, los caudales presentan para el resto del año una energía que tiende a los 1.6 m. Dicho comportamiento se alcanza conforme los tirantes aumentan sin importar el caudal, lo cual no presenta algún riesgo de desbordamiento dada la geometría del canal.

<sup>13</sup> Se utiliza el término canal para referirse a los dos canales que conforman la obra de toma.

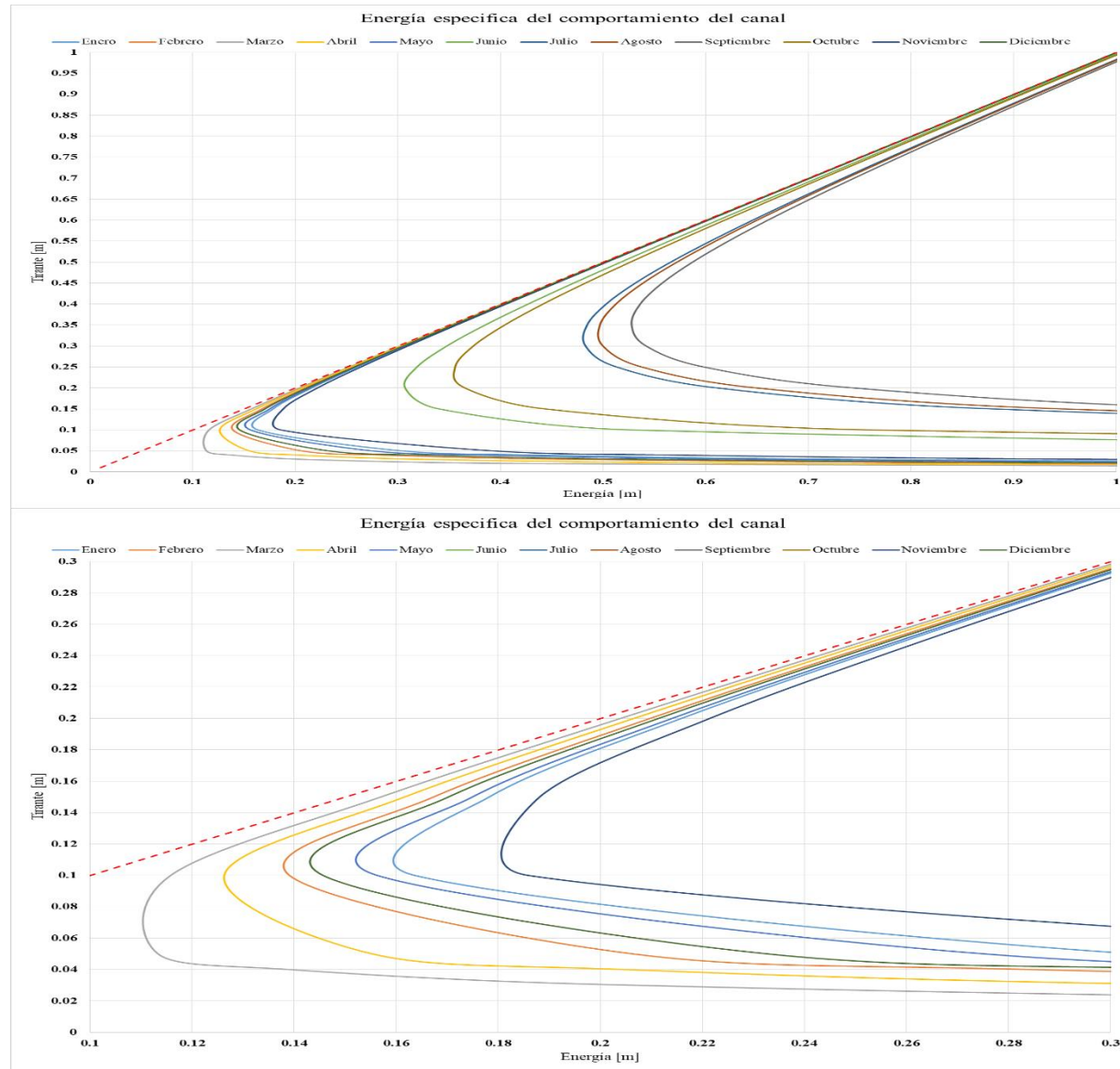
Con dicha información se pudieron calcular los tirantes alternos para todo el año, cuyos resultados se observan en la **Tabla 15** y en la **Figura 75**, en ellas se observa un comportamiento más cercano a la energía mínima de los meses menos lluviosos (enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre), acercando el comportamiento del caudal a la asíntota del gráfico, cuyo valor entre energías mínimas es menor, encontrándose en el intervalo de 0.102 - 1.80 m.

**Tabla 15:** Energía mínima, tirantes alternos y tirante crítico a lo largo del año.

Mes	Q [m <sup>3</sup> /s]	y <sub>c</sub> [m]	Emín	Tirantes alternos [m]	
				Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
Enero	0.22	0.108	0.163	1.59	0.19000
Febrero	0.18	0.092	0.138	1.59	0.01600
Marzo	0.11	0.068	0.102	1.59	0.00984
Abril	0.14	0.081	0.121	1.59	0.01880
Mayo	0.21	0.104	0.156	1.59	0.05260
Junio	0.58	0.205	0.307	1.59	0.105
Julio	1.14	0.320	0.481	1.59	0.109
Agosto	1.19	0.330	0.495	1.59	0.121
Septiembre	1.31	0.352	0.528	1.59	0.121
Octubre	0.72	0.236	0.355	1.59	0.065
Noviembre	0.26	0.120	0.180	1.59	0.023
Diciembre	0.19	0.097	0.146	1.59	0.017



**Figura 74:** Energía específica del canal a lo largo del año.



*Figura 75: Proyección de energía específica*

Los gráficos de energía específica muestran un comportamiento uniforme de la que es aprovechable para el canal en el régimen de caudal actual. Se muestra que el comportamiento de dicha energía está dividido para tres etapas del año. Es decir, la primera etapa se refiere a los meses de estiaje (Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Noviembre y Diciembre); la segunda etapa de comportamiento energético, se da en los meses de Junio y Octubre, que son de media precipitación, marcando la transición entre meses lluviosos y de estiaje; y la tercera etapa del comportamiento de la energía, se observa para los meses más lluviosos: Julio, Agosto y Septiembre.

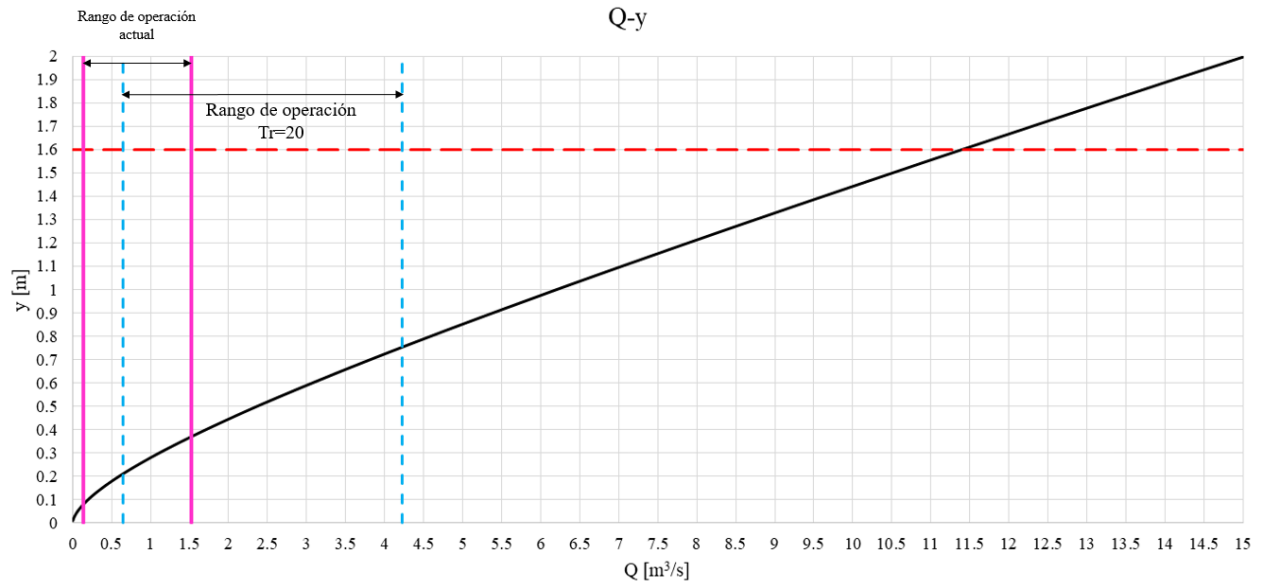
Es posible establecer una primera aproximación de viabilidad energética de acuerdo con el comportamiento del flujo en el canal bajo las condiciones de flujo uniforme. La energía tendiente a igualarse en un punto específico equivalente a 1.6m totales marcados por los tirantes alternos en cada una de las curvas de caudal, esto por las características geométricas en el canal, donde el caudal a pesar de ser bajo mientras el tirante se mantenga en el rango establecido generará el máximo pico de energía, de igual forma cuando se tiene un caudal mayor.

Con lo descrito en la **Tabla 15**, los tirantes alternos tienen valores muy bajos, pero la energía específica en el canal con dichos tirantes, resulta ser suficiente para aprovecharla en la generación eléctrica, lo que garantiza una producción importante de energía con las condiciones descritas anteriormente.

### 3.3.1.2 Resultado de diseño a flujo uniforme

El diseño bajo el criterio de flujo uniforme, permite analizar las obras hidráulicas con escenarios más altos de comportamiento de caudal, lo que implica escenarios más acercados al comportamiento real del flujo en canales abiertos. Este tipo de gráficos ayudan a entender el comportamiento del flujo y así proponer algún tipo de turbina para su aprovechamiento.

En la **Figura 76** se observa el comportamiento del flujo dada la geometría del modelado, mediante las características de flujo uniforme, como se mencionó en la sección de dimensionamiento. Esto permite observar el caudal máximo que el canal soportaría en caso de avenidas máximas. El canal de generación está diseñado para un caudal máximo de  $11.40 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor que se obtuvo a partir de los resultados que ofrece el método HMS-SCS para el mes de Julio. Esto para garantizar que el canal soporte un caudal alto en temporada de avenidas. Para dicho caudal se supone un tirante de 1.6 m (línea roja punteada del gráfico de la figura 70), respetando el alto de bordo libre y obteniendo el gráfico citado en el comportamiento. Se observa que el tirante aumenta conforme el caudal aumenta, de esta forma se puede decir que la energía mostrada y descrita aumenta con el caudal, de manera directamente proporcional.



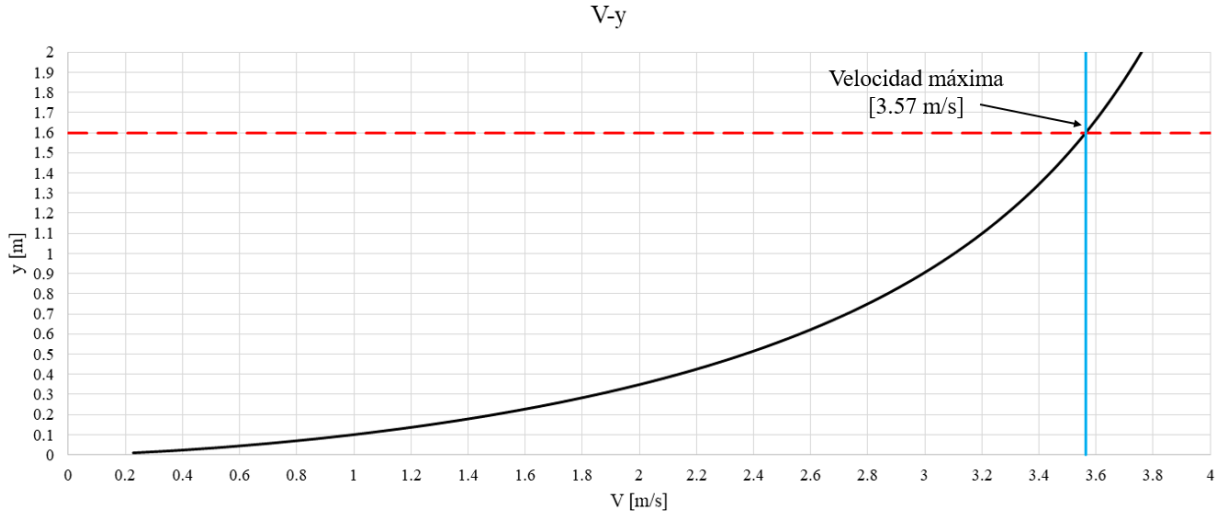
**Figura 76:** Comportamiento del caudal medio del canal en flujo uniforme, caudal contra tirante.

Con el comportamiento de flujo uniforme, se pudo determinar el intervalo de operación para la generación hidroeléctrica. En el apartado descrito como “rango de operación actual”, se refiere a aquel obtenido a partir de los caudales aforados y los datos históricos hidrométricos, es decir, para un intervalo de caudales de  $0.35$  a  $1.5$   $\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que se observa el rango de operación mediante los caudales del método racional, el cual, al subestimar los caudales, muestra un escenario mínimo de generación en distintos periodos de retorno.

A partir de la caracterización del flujo, y el análisis de energía y potencia, se observa que el método racional al proyectar valores de caudal más bajos en comparación con el método SCS, de acuerdo a los medios hidrométricos, la energía calculada, con dichos valores del método racional, es menor por lo que al determinarse como un escenario de generación y al definirse calculado a eventos de probabilidad ( $Tr$ ), el rango de dicho comportamiento suceda es mayor, tomando como condición máxima el obtenido a partir de método SCS, cuya finalidad de lo descrito es no comprometer energía apegándose a los rangos de probabilidad observados.

En la **Figura 77** se observa el comportamiento de la velocidad de flujo en el canal de generación, el intervalo de velocidades mostrado se encuentra entre  $0.2$  y  $3.57$   $\text{m/s}$ . Respetando el intervalo de tirantes permisible en el canal propuesto, el rango de velocidades, que se pueden alcanzar en el canal de generación, es función del tirante, esto por la disponibilidad del recurso. Derivado de dicha aproximación se optó por una turbina de eje lento.



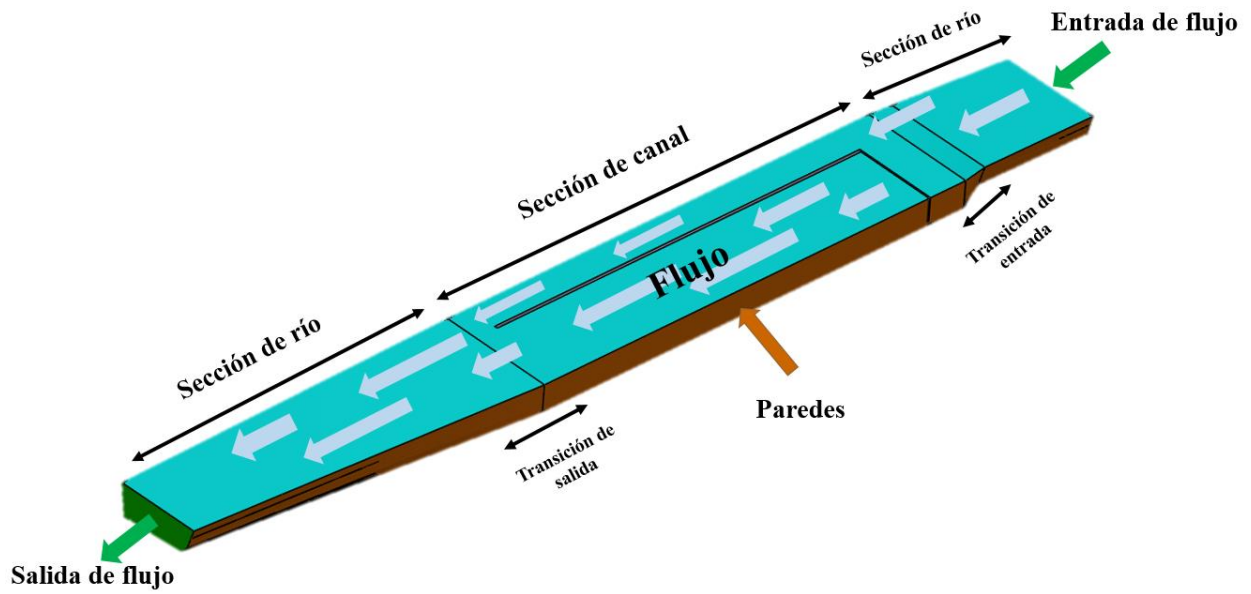


**Figura 77:** Comportamientos de velocidad e flujo en función del tirante, para el canal rectangular propuesto.

Es importante mencionar nuevamente, que el canal diseñado tiene un canal paralelo de 5 m de ancho para los caudales ecológicos, y aquellos que lleguen a sobrepasar un tirante de 1.6 m, controlado a partir de la compuerta. El canal de 5 m soporta un caudal máximo de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin embargo, la obra de toma podría soportar mucho más caudal, si ambos canales trabajan a su máxima capacidad. Es importante mencionar que el río no soportaría los caudales máximos que soporta el canal propuesto. Esto debido a la capacidad de conducción del río en su estado natural y su rugosidad actual. Además, de acuerdo a los registros históricos de caudales, es poco probable que se presenten caudales extraordinarios de acuerdo a los periodos de retorno y a la vida útil del proyecto de generación.

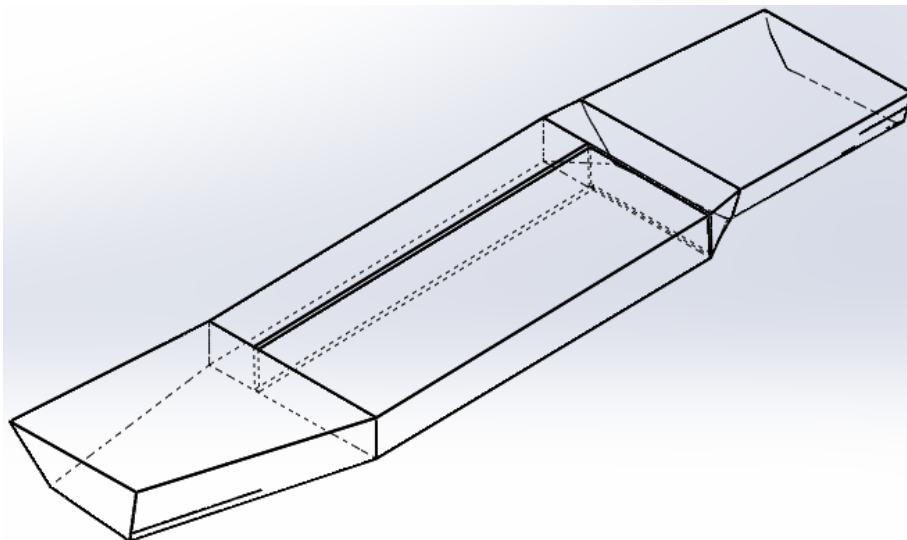
### 3.3.2 Análisis y modelación del canal en 3D.

Para realizar la modelación en ANSYS Fluent, fue necesaria la construcción de la geometría a simular, es decir el dominio del fluido. Se utilizaron las coordenadas de las secciones aledañas a la sección 3720, 15 metros aguas arriba y 45 metros aguas abajo. Esta última por la longitud del canal, lo que se puede observar en la **Figura 78**. Los cortes mostrados, son aquellas secciones donde no existe fluido, es decir la compuerta y el muro que divide ambos canales. En la figura también se describen características generales de conformación del dominio de flujo, como la transición de entrada y de salida con respecto a la sección del río al canal.



**Figura 78:** Vista isométrica del dominio de flujo. Diseño final (Canal 3) con canal rectangular de 30m de longitud.

El canal rectangular de generación y el desfogue planteado inicialmente tuvo una longitud de 15 m. Con el análisis tridimensional preliminar se realizó un ajuste de dimensiones para mejorar el comportamiento del flujo, principalmente en la entrada y salida. En la **Figura 79** se observa la geometría generada con base en el primer planteamiento del canal.



**Figura 79:** Vista isométrica del dominio de flujo, canal inicial (canal 1)

Se aplicaron las siguientes mejoras después de la modelación preliminar:

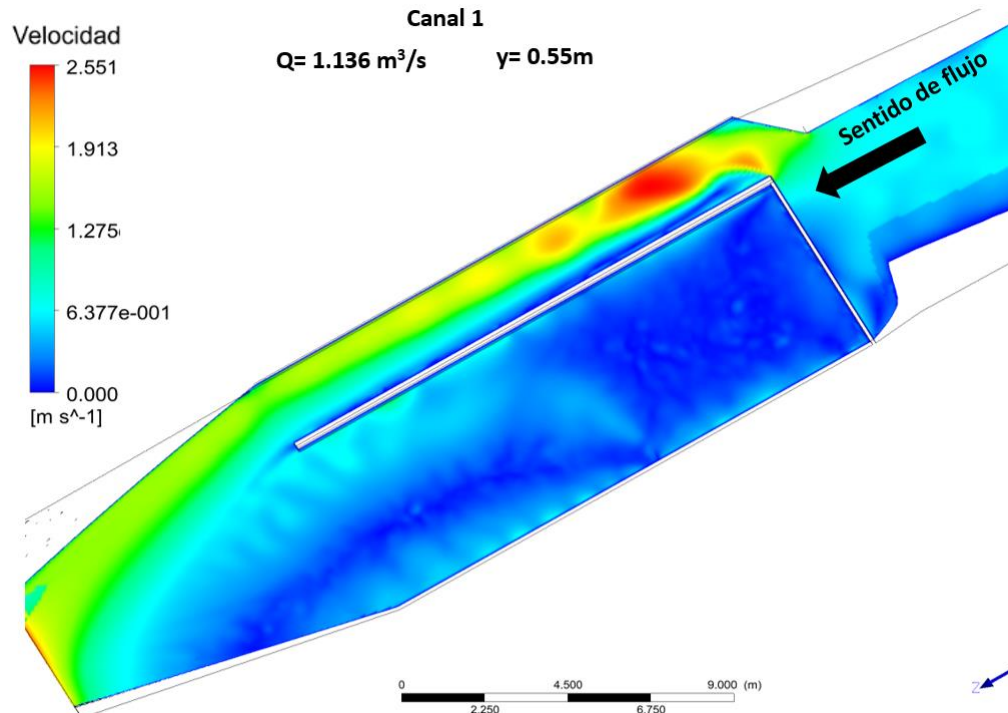
- Aumento de la longitud del canal para evitar recirculación
- Disminución la longitud del muro en salida para evitar turbulencia.
- Desplazamiento de la entrada del flujo dentro del canal para minimizar la zona de transición.

### 3.3.2.1 Resultados canal inicial

Las dimensiones de la primera propuesta de canal se establecieron para reducir los costos de construcción y el material considerando una longitud menor. Sin embargo, hidráulicamente no resultó viable, ya que limitaba el comportamiento de la velocidad del flujo ocasionando fluctuaciones en las zonas aledañas al muro. Las condiciones iniciales del canal era una longitud de 15 m, ancho de 7 m y longitud de muro de 15 m, por lo que este último concordaba con la zona de transición de río al canal.

#### • Canal 1

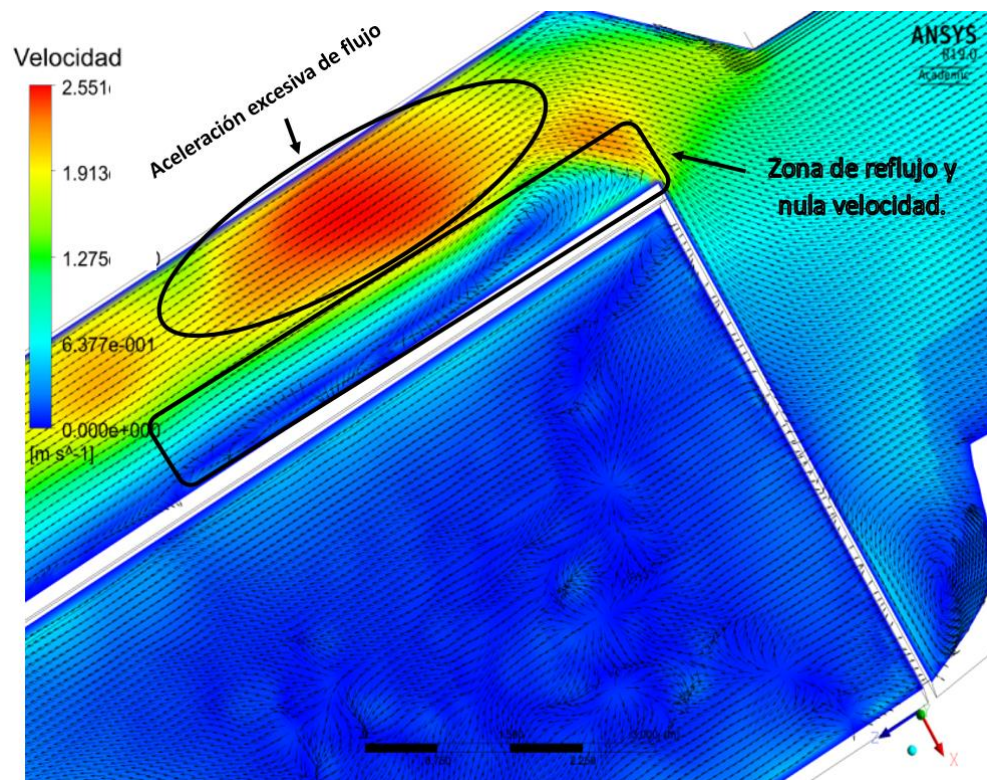
En la **Figura 80** se observa el comportamiento de la velocidad de flujo en la capa superior del tirante del canal, donde las zonas de color amarillo y rojo son aquellas en las que se tiene mayor velocidad, por lo que el canal de menor ancho, es decir, el de generación, muestra una aceleración considerable de flujo. Esto en comparación con la velocidad presente en la entrada de la sección de río manifestando un comportamiento positivo para la generación hidroeléctrica en el canal de generación diseñado.



**Figura 80:** Contorno de velocidad total en el canal de longitud 15m. Vista en planta  $y=0.55m$ .

Sin embargo, el canal de generación presenta valores de velocidad muy bajos, y “zonas muertas” de baja o nula velocidad, que disminuyen la uniformidad de comportamiento de velocidad. Esto no es favorable para la instalación de turbinas para generación eléctrica ya que presentarían un comportamiento fluctuante entre ellas. Las zonas de color azul mostradas en la imagen representan principalmente un efecto de remolino y estancamiento del flujo, por lo que se generan zonas de baja y nula velocidad, comportamiento que se observa de manera general en el canal de desfogue y zonas cercanas al muro una vez que el flujo se ha distribuido en ambos canales. También se observa que la salida de flujo presenta una velocidad óptima, sin embargo, la zona de canal y transición del cauce genera nuevas zonas de nula velocidad.

En la **Figura 81**, se observa la zona de transición de flujo del cauce al canal de generación. El flujo se acelera al entrar al canal, y aumenta la velocidad gradualmente pero se crea un efecto de remolino en la entrada (vórtice), provocando así aceleración mínima en la parte superficial de la entrada sobre el cauce. Al observar los vectores de flujo de velocidad se puede establecer que la compuerta queda sumergida con el flujo, con valores de velocidad cercanas a cero y ocasionando recirculación, por lo que se denota almacenamiento en la zona, consecuencia del efecto en salida del canal.



**Figura 81:** Comportamiento de velocidad en la zona de transición de entrada de flujo.

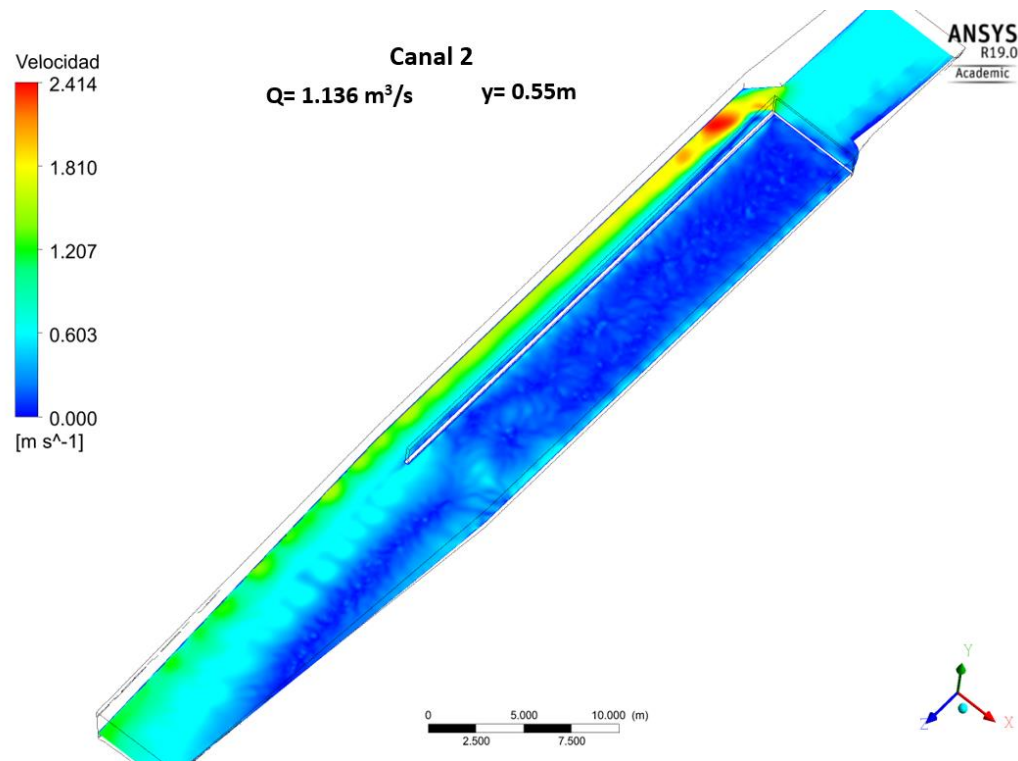
### 3.3.2.2 Mejora geométrica de las transiciones del canal

Con los cambios de longitud en el canal para logra estabilidad del flujo (aceleración constante en el canal de generación), se extendieron 15 m de, considerando una longitud total de 30 m. Para el caso

del canal 2 se conservó un comportamiento de longitud de muro similar al canal (30 m), mientras que en el canal 3 el muro tiene una longitud menor igual a 26 m, dichas mejoras se analizaron con las condiciones iniciales de acuerdo al caudal máximo de los datos medios hidrométricos y al tirante que este representa en la entrada del flujo.

- **Canal 2**

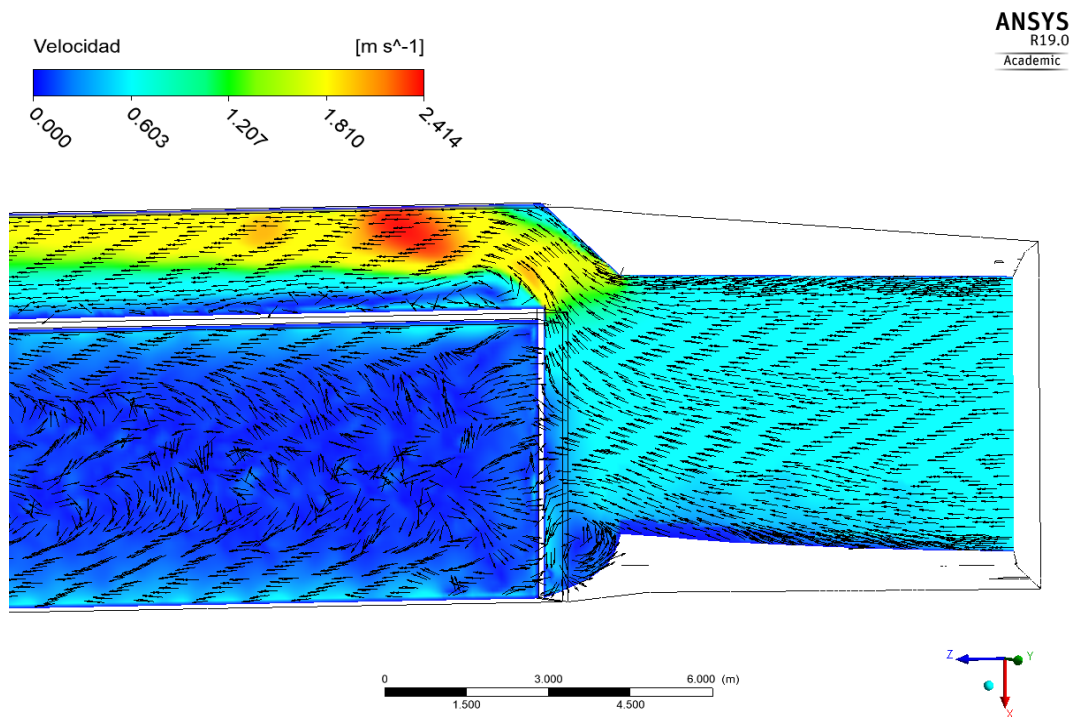
En la **Figura 82**, se observa una aceleración de flujo en el canal de generación y un notorio aumento de velocidad a la entrada en la parte de división de canales. Se determinó que esto sucedía, por la transición fortuita del cauce a canal, generando una perturbación de flujo, y nuevamente zonas con nula velocidad, llamadas coloquialmente “zonas muertas”. Sin embargo se logra una estabilidad de flujo al centro del canal. Al existir perturbaciones en la aceleración en las zonas cercanas al muro las velocidades más altas se encuentran cercanas al talud del canal por lo que ocasionaría efectos negativos en el correcto funcionamiento de la turbina.



**Figura 82:** Vista isométrica del comportamiento de flujo en el canal:  $L_{canal}=30\text{ m}$  y  $L_{muro}=30\text{ m}$ .

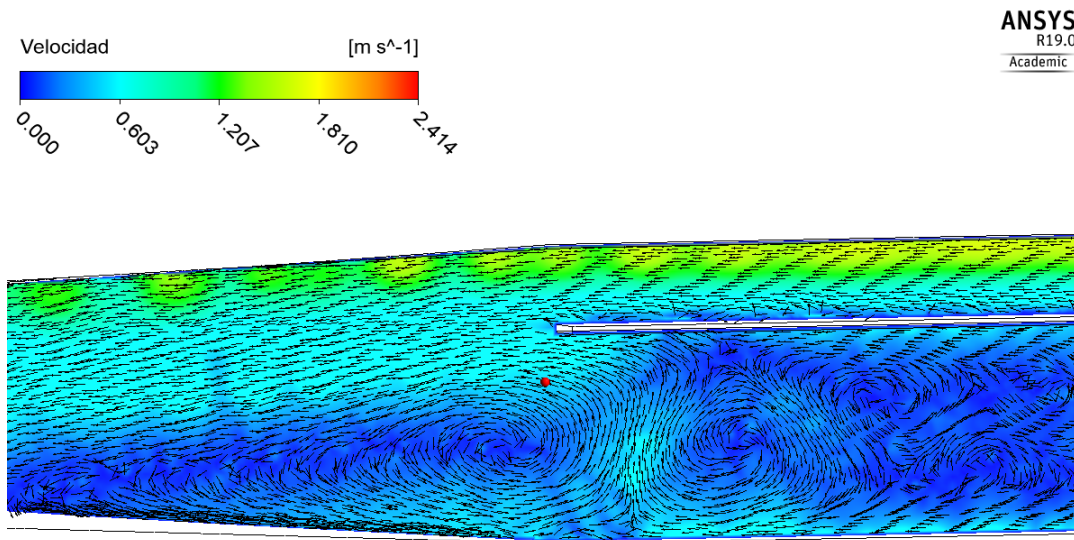
En la **Figura 83** se observa la inestabilidad de comportamiento del flujo a la entrada del canal de generación. La velocidad del flujo respecto a la nueva longitud del canal tiene un comportamiento de velocidad más uniforme, por lo que se garantiza un alto desempeño para la turbina. Mientras que en el canal de la compuerta, continua sumergido hasta la altura de la compuerta como en el escenario anteriormente descrito, generando almacenamiento y recirculación de flujo. Dichos comportamientos se atribuyeron principalmente a la ubicación del muro y la compuerta, así como al flujo que pasa debajo de la compuerta a través de un área reducida.





**Figura 83:** Acercamiento a la zona de transición canal dos

En la **Figura 84** se observan los vectores de comportamiento del campo de flujo en la zona de salida del canal. De acuerdo con las características de transición, principalmente en el canal de desfogue, el comportamiento del flujo es turbulento. Debido a esto, se plantea la segunda mejora al canal, la cual consistió en reducir el muro dos metros a la salida y desplazar el muro y compuerta de entrada dos metros dentro del canal. Esto para auxiliar al flujo a tener un comportamiento menos vorticoso en las respectivas zonas. La propuesta de incrementar el largo del canal de obra de toma, fue favorecedora ya que en este caso el flujo logra restablecerse de manera casi uniforme con respecto a la velocidad, de acuerdo con lo observado por los vectores en el canal de generación, logrando así la disminución notoria de “zonas muertas” cercanas al muro de división de los canales a lo largo del mismo y favoreciendo de esta manera el aprovechamiento energético.

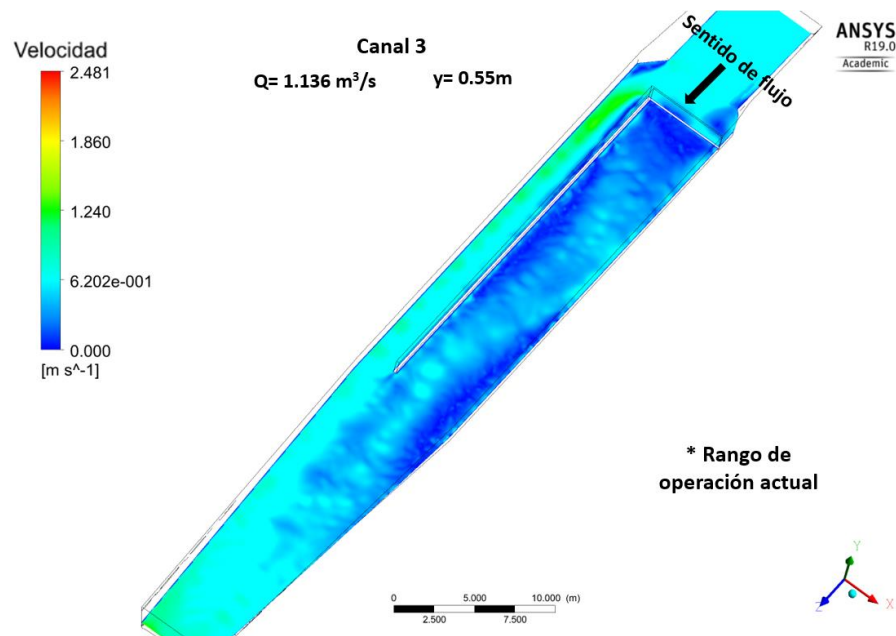


**Figura 84:** Comportamiento del flujo a la salida del canal dos

- **Canal 3 y rango de operación actual**

En la **Figura 85** se observa el comportamiento de flujo en la obra de toma con las mejoras planteadas, donde las estas consistieron en disminuir el tamaño de muro a 26m, la zona de inicio y la compuerta se desplazó 2 metros al interior del canal y reduciéndose 2 metros la salida, ocasionado un escenario más favorable del comportamiento de velocidad en la obra de toma (rango de 0-2.5 m/s). La aceleración del flujo en la zona de transición de la sección del río al canal se ha reducido al igual que las “zonas muertas”. El comportamiento de velocidad de flujo en el canal de generación se muestra constante después de 8 metros por lo que al tener una velocidad homogénea se cuenta con potencial de comportamiento para la instalación de la turbina. Sin embargo, el comportamiento en el canal de desfogue se mantuvo la recirculación y la compuerta embebida, pero no afectando a la generación hidroeléctrica. Por lo que se concluye que el diseño optimo del canal para obra de toma es el descrito en esta sección y en el cual se llevaron a cabo los escenarios de comportamiento de generación del caudal, (rango de operación actual y rango de operación  $Tr = 20$ ).

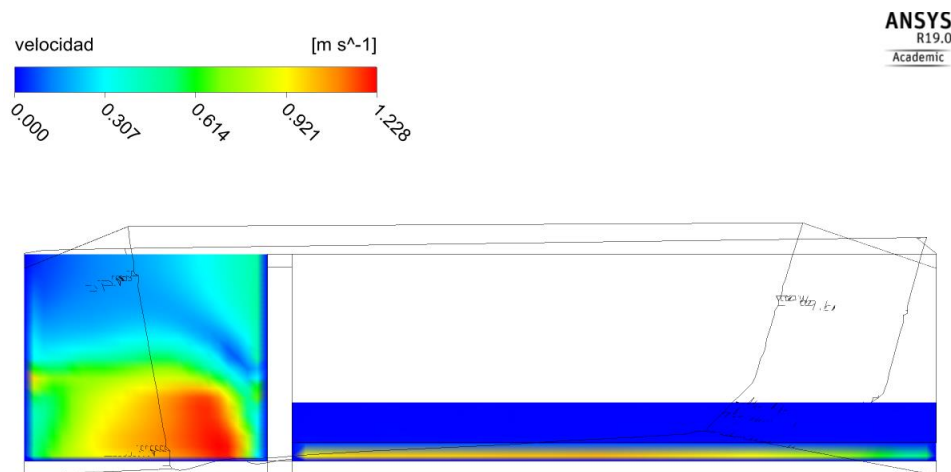




**Figura 85:** Comportamiento de flujo y velocidad, canal tres.

El comportamiento descrito del canal 3 es aquel cuyas condiciones de frontera, se apegan al rango de operación actual, es decir a partir del caudal máximo mensual hidrométrico obtenido (mes de julio), dando como resultado un comportamiento adecuado para la generación en el canal. Es decir, se tiene un rango de velocidad aceptable para generación hidroeléctrica, así como un escurrimiento anual perene. Bajo este criterio se describen las figuras contiguas, analizando el comportamiento puntal del canal.

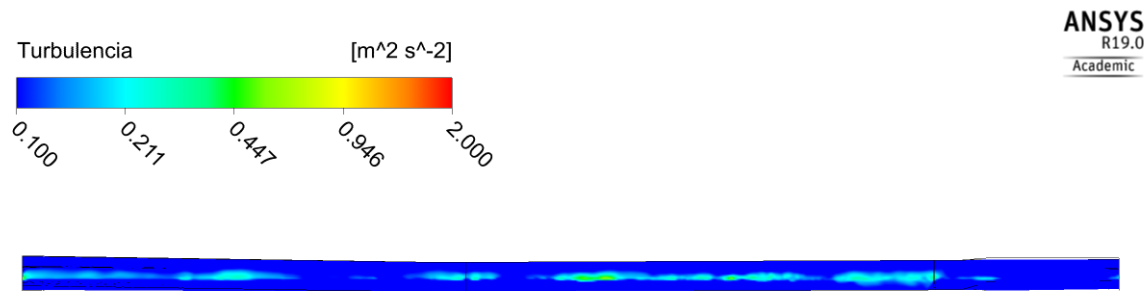
En la **Figura 86**, se muestra el comportamiento de velocidad de flujo en la compuerta y en el canal de generación. La mayor velocidad se encuentra cercana al muro y al fondo del canal, cuyo comportamiento se debe al tirante de agua. Mientras que en el canal paralelo se observa que la velocidad es alta de acuerdo a la escala local establecida (0.92-1.22), fenómeno ocasionado por la circulación de una gran cantidad de agua en un área muy pequeña.



**Figura 86:** Análisis de comportamiento de velocidad de flujo en la compuerta

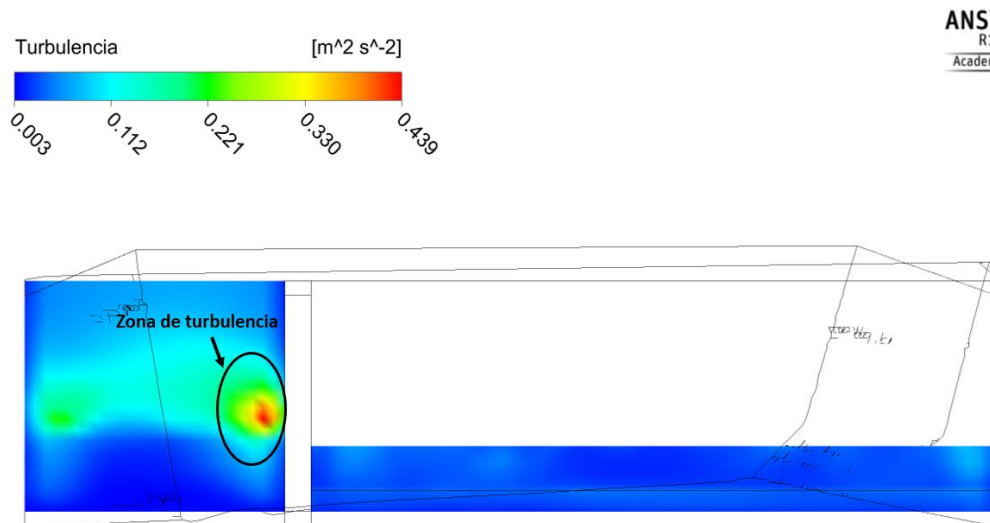
***Turbulencia en el canal de generación, rango de operación actual.***

Para dar un mayor acercamiento al comportamiento de flujo en la **Figura 87** se muestra una vista lateral del canal de generación. De acuerdo con el tirante correspondiente existe una zona de turbulencia en la parte superior del tirante, siendo un comportamiento normal, pero como se ha mencionado anteriormente, se genera un estado turbulento no relevante en la zona de división de canales. Así, se determina que el diseño ayuda a la aceleración de flujo fomentando una cantidad de turbulencia que no afectaría el correcto funcionamiento de la turbina.



**Figura 87:** Vista lateral de comportamiento de flujo en el canal de generación

En la **Figura 88** se observa específicamente el área de compuerta y canal de generación respecto a un análisis de turbulencia donde esta es más elevada en la zona cercana a la pared del canal. En la zona de la compuerta no se observa perturbación por turbulencia significando que el agua está estancada en dicha zona. La turbulencia representada y analizada a través de varios análisis de flujo sobre el canal no resulta significativa para afectar la generación y los fines de objetivo del proyecto.

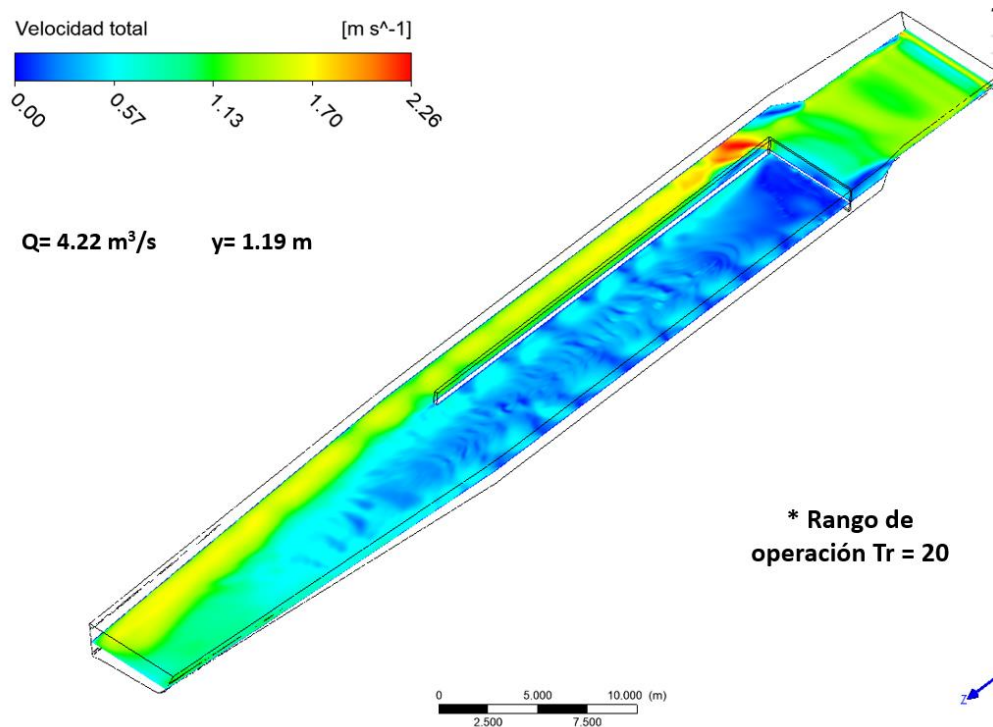


**Figura 88:** Análisis de turbulencia de flujo, en la zona de división de canal.

### 3.3.2.3 Rango de operación a $Tr = 20$

El escenario descrito a continuación, se encuentra demostrado en la geometría de flujo del canal 3, los parámetros de entrada establecidos de acuerdo al caudal máximo para el mes de julio en un  $Tr = 20$  años, correspondiente al método racional, dado que es el método que establece un comportamiento energético mínimo a 20 años granizando con mayor seguridad dicha conducta proyectada.

En la **Figura 89**, se observa el comportamiento en el tirante máximo del caudal que entra a la geometría de flujo, donde las zonas de transición de color de verde a rojo, son aquellas que tiene una velocidad mayor (1.70-2.26 m/s) de acuerdo al rango local de velocidad. En la entrada de la sección del río el flujo conserva una velocidad mayor a 1 m/s, y en el canal de generación alcanza una velocidad optima donde la velocidad es uniforme y mayor en la longitud del mismo. No así en la zona de desarrollo del flujo (la entrada de canal y el muro). Así, se establece que el punto óptimo de acuerdo al escenario máximo en un  $Tr = 20$  y el escenario descrito anteriormente de rango de operación actual, la turbina se recomienda instalar a una distancia de ocho metros a partir del inicio del muro hasta 24 metros, teniendo un rango con potencial de 16 metros.

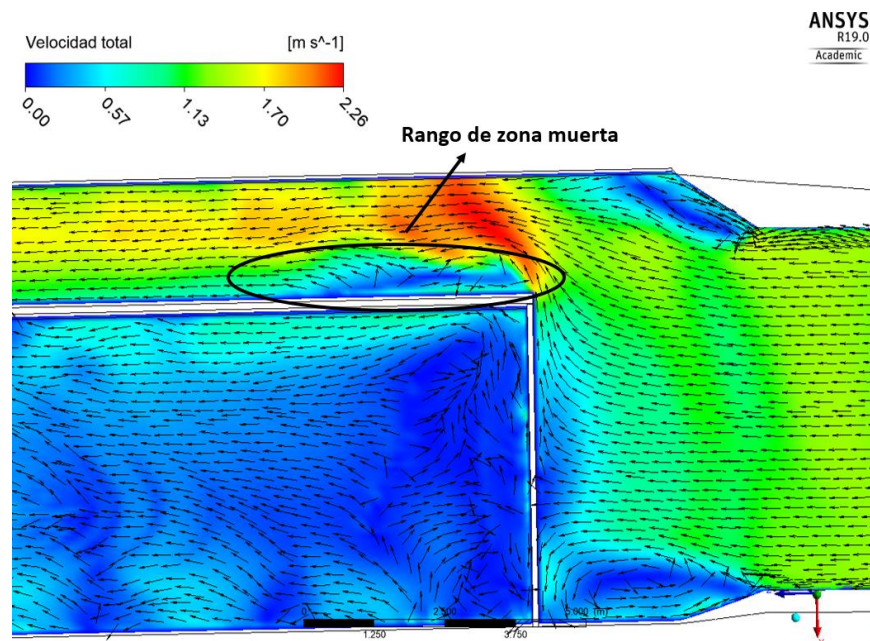


**Figura 89:** Análisis de comportamiento de velocidad de flujo en el canal tres condiciones  $Tr = 20$ .

En el canal de desfogue observando la **Figura 89**, se tiene movimiento del flujo, evitando la recirculación. El comportamiento es menos turbulento y no afecta en la generación hidroeléctrica.

Dando un acercamiento a la zona observada con una mayor aceleración a la entrada del canal de generación, en la **Figura 90** se observa que en la entrada al canal se genera una “Zona muerta” no significativa y una aceleración del flujo. Sin embargo, dadas las características de flujo, este se

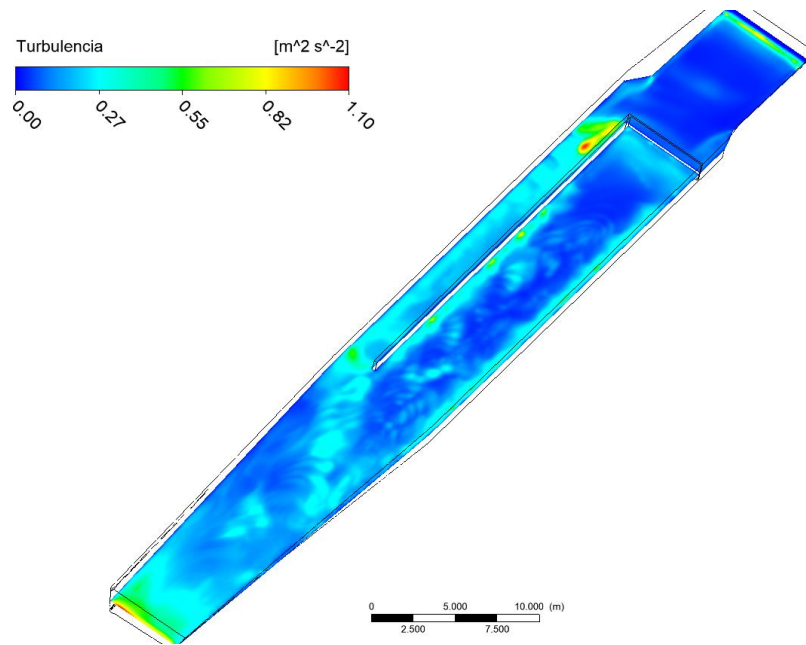
restablece gradualmente a lo largo del canal y se recomienda que la ubicación de la turbina sea evitando la entrada en canal.



**Figura 90:** Comportamiento del flujo en la zona de entrada al canal,  $Tr = 20$  años.

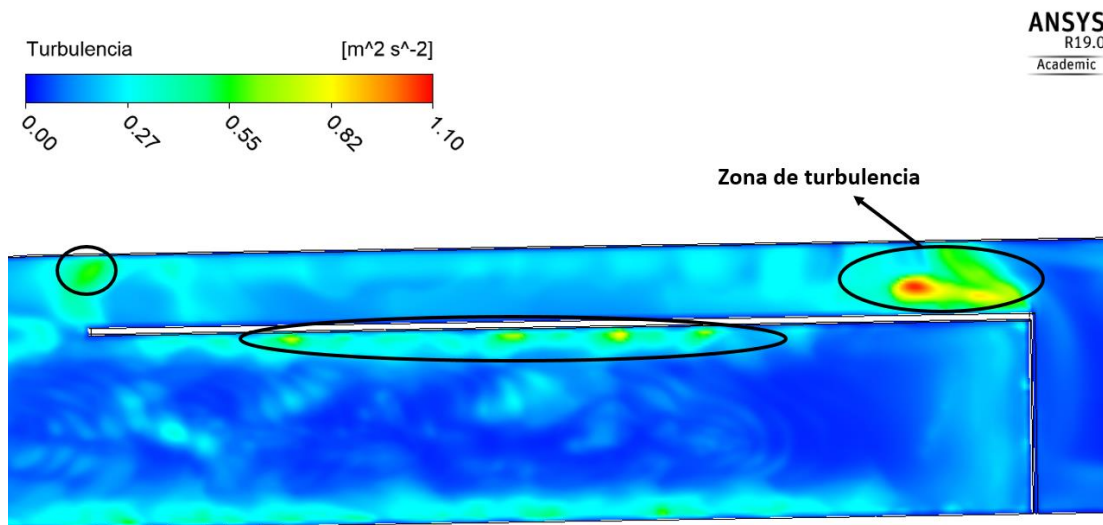
***Turbulencia en el canal de generación, rango de operación  $Tr = 20$  años.***

En la **Figura 91**, se observa el comportamiento de turbulencia general en la obra de toma y la transición de entrada del río a la misma. Se destaca la entrada de flujo en la división respectiva de canales generando un rango de turbulencia ( $0.82- 1.18 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ). Comparado esto con la velocidad observada es donde se tiene una aceleración mayor, dicho comportamiento turbulento no afecta la generación siempre y cuando se presente el restablecimiento de flujo (comportamiento considerable turbulencia) a lo largo del canal. Al observar los valores de turbulencia, se determina que ésta se estable a lo largo del canal, promoviendo la uniformidad en el comportamiento de flujo. El mayor rango de turbulencia se observa a la salida del canal, no afectando aguas arriba donde se ubicará la turbina de generación.



**Figura 91:** Vista isométrica de comportamiento de turbulencia,  $Tr = 20$ .años

Dando un acercamiento de comportamiento de turbulencia en el canal, en la **Figura 92** se observa que el rango de turbulencia no es significativo en la zona de división de flujo. Dada la magnitud de la turbulencia, esta no representa riesgos para el comportamiento de generación aun cuando se observan pequeñas perturbaciones de flujo en el canal de desfogue.



**Figura 92:** Acercamiento a la zona de turbulencia escenario  $Tr = 20$

### 3.4 Selección de turbina

En el presente apartado se describen de manera general la comparativa de dos turbinas comerciales para generación de energía eléctrica a partir de una corriente de agua a superficie libre, como se puntualizó en la sección 2.9 son de tipo hidrocínética ambas de eje horizontal. Esto con la finalidad de evitar perturbaciones mayores al medio. De acuerdo con las características del flujo mostradas con las simulaciones 3D, se tomaron en cuenta las turbinas descritas en la **Tabla 16**. Tomando en cuenta lagunas referencias comerciales de la marca alemana Smart Hydro Power, se analizó el modelo que se adapta a la necesidades de flujo. Mientras que para el caso de la marca canadiense Idénergie, el despunte de desarrollo tecnológico que esta ha tenido los últimos años llevo al análisis de sus productos observando buenas características de acuerdo con la necesidades, principalmente al tamaño y peso de su dispositivo realizando la respectiva comparación económica (Cambio \$23.47 MXN/EUR, \$15.50 MXN/CAD) y de generalidades energéticas de ambas.

**Tabla 16:** Turbinas hidrocínéticas comerciales de baja potencia

Modelo de Turbina Fabricante	Smart free stream Smart Hydro Power	River Turbine Idénergie
Costo [MXN]	8 500.00 € \$ 199 473.75	12 500.00 CAD \$ 193 765.00
Potencia Nominal [W]		
Min	250	100
Max	5000	500
Peso [kg]	300	91
Velocidad [rpm]		
Min	90	80
Max	230	150
Profundidad Mínima río [m]	1.1	0.7
Ancho mínimo de río [m]	1.2	1.3
Velocidad del caudal [m/s]		
Min	1	1
Max	3.1	2.5
Energía producida [kWh/año]		
Min	2 190	876
Max	43 800	4 380

Ambas turbinas se adaptan a las características de flujo, sin embargo destaca la Smart free stream por precio y la cantidad de energía que esta puede generar. Mientras que la turbina Indérgie destaca por las características de instalación ya que podría instalarse más de dos en el canal de generación con la desventaja de que se elevaría el costo de inversión.



### 3.4.1 *Smart free stream, Smart Hydro Power*

La empresa Smart Hydro Power, de origen alemán ha desarrollado una serie de turbinas para flujos a superficie libre respaldada por proyectos funcionales alrededor del mundo, la turbina se seleccionó para análisis dados las características de generación y las dimensiones de la misma, en la **Figura 93** se observa la turbina de manera general mientras que en el **Anexo 9**, se describen con la ficha técnica las características generales de la misma. Esta tiene un rango de generación de 250-5000 W, por lo que resulta óptimo para generación y distribución de energía, dada la longitud equivalente de un metro de ancho, en el canal diseñado pueden instalarse dos de ellas de manera paralela, aumentando así la producción de energía.



**Figura 93:** Turbina Smart free stream (80).

Una de las ventajas principales de la turbina es que cuenta con un sistema de rejillas para la retención de sólidos de gran tamaño y peces. El sistema de anclaje de dicha turbina no representa perturbaciones al medio y su instalación se realiza en menos de 24 horas, sin embargo la conexión a la red puede variar en tiempo. Para lograr un óptimo desempeño energético de la misma de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, es necesario aumentar el tirante del rango de operación actual a un metro para que la turbina se encuentre casi sumergida. El rango de tirantes se puede alcanzar con la implementación de un vertedor o dividiendo el canal de generación en dos secciones específicas para aumentar el tirante. Sin embargo esta última opción podría afectar el desempeño de velocidad de flujo.

### 3.4.2 *River Turbine, Idénergie*

Esta es una turbina hidrocínética (para flujo a superficie libre), desarrollada por la empresa Idénergie, de origen canadiense, en la **Figura 94**, se describen los elementos que conforman la turbina, mientras que en el **Anexo 10**, se tiene la ficha técnica con las características de energéticas de la misma donde el rango energético va de 100 a 500 W. La empresa desarrolladora recomienda la instalación de más de una de ellas para una generación mayor, mostrando diagramas



de instalación. Con las características de ancho de canal (2 m) y ancho de la turbina se pueden instalar dos de ellas. Dando como resultado una generación entre un rango de 200-1000W (81).



**Figura 94:** Generalidades de la turbina Indénergie (81)

La turbina tiene como ventajas, el bajo peso y la fácil instalación de la misma. Sin embargo, al igual que turbina de la empresa Smart Hidro Power, para tener una generación mayor es necesario aumentar el tirante en el canal, durante el rango de operación actual, por lo que se propone la instalación de un vertedor o la reducción del ancho del canal.

Es importante mencionar que la turbina bajo las características de la misma se establece en un rango de generación más local, es decir, para alimentar solo una casa habitación en un consumo promedio. Por lo que para distribución sería necesaria la implantación de más de dos de ellas. Esto resulta viable ya que la longitud del canal permitiría la distribución de las mismas para tener un rango de generación mayor. Sin embargo este análisis económico y energético bajo la condición del producto no se encuentra dentro del rango del proyecto.

### 3.5 ESTUDIO DE VIABILIDAD AMBIENTAL

Este apartado expone la viabilidad ambiental de la posible implementación en campo de este proyecto, el cual tiene como fin el aprovechamiento energético para aportar al abastecimiento de energía eléctrica al poblado de Benito Juárez en el municipio de Almoloya de Juárez, Estado de México, cuyas características se describieron en la sección 1.2.2 de este trabajo.

La central hidroeléctrica tendrá una capacidad instalada efectiva de 200 kW, con un factor de planta de alrededor del 60% por lo cual tendrá una generación eléctrica aproximada de 1051 MWh/año, contará con un permiso de interconexión a la línea de abastecimiento y distribución eléctrica de la

Comisión Federal de Electricidad (CFE), permitiendo así suministrar energía a la población de Benito Juárez.

El punto de conexión a la línea de CFE se encuentra a 270 m de distancia de la casa de máquinas, la cual estará formada por una turbina de eje lento, un generador eléctrico, un transformador adecuado al tamaño del potencial de producción y los conductores necesarios para interconectarse a la red eléctrica de la CFE. En este caso será necesaria la construcción de una pequeña subestación de transformación para el control de los niveles de tensión que se pueden presentar en las variaciones de generación eléctrica.

### 3.5.1 Justificación

El presente proyecto “Pequeña central hidroeléctrica cuenca Rio La Gavia”, se enfoca en la implementación de una pequeña central hidroeléctrica, la cuenca del río La Gavia en el Estado de México, para el beneficio de la comunidad de Benito Juárez en el municipio de Almoloya de Juárez, podría favorecer a una población de aproximadamente 3000 personas.

Se pretendió la implantación de un central de este tipo ya que de acuerdo a la Ley de la Industria Eléctrica y a la Ley de Transición Energética, para poder considerar proyectos de energía hidroeléctrica de manera renovable su potencia total efectiva instalada tiene que ser inferior a 30 MW, ya que se pretende la menor perturbación en el medio con la instalación de esta.

Algunos otros de los beneficios importantes a destacar dentro de la implementación de la central, es que se generaran 20 empleos de manera directa, y alrededor de 25 empleos de manera indirecta, con este proyecto también se llevarán a cabo proyectos a beneficio de la comunidad como el mejoramiento del cableado eléctrico, con el que esta comunidad ya contaba pero que no era suficiente para distribución de electricidad dentro de esta.

Con la distribución de la energía hidroeléctrica dentro de la comunidad, se pretende aumentar el precio del predio en la zona, de igual manera al tener acceso a la energía eléctrica de manera uniforme, se pretende poder instalar en un mediano plazo otros bienes y servicios en la comunidad.

- *Cronograma de trabajo general*

Para la construcción y puesta en marcha del proyecto se pretende un tiempo de alrededor de un año, desde la gestión de permisos y adquisición del predio para la construcción, hasta la conexión y distribución de la energía generada. En la **Tabla 17** se muestra un desglose de las diferentes etapas de implementación del proyecto.

- *Crecimiento a futuro.*

Se pretende la modernización continua del equipo para que ese se mantenga en la generación adecuada para la óptima calidad de vida de los pobladores. Es posible la construcción de un sistema de almacenamiento por volante de inercia para el aprovechamiento máximo de la energía cuando el caudal se encuentre en su máximo desarrollo.

Con el crecimiento a futuro, se pretender crear dentro los proyectos conjuntos a este, el mejoramiento de la casa de máquinas, pavimentar el camino para comenzar a promover el

ecoturismo en la zona al ser una zona rica en especies animales y vegetales y así ayudar a la economía local.

**Tabla 17:** Descripción de las actividades a realizar durante la construcción del aprovechamiento hidráulico.

Etapas	Actividad	Tiempo requerido [semana]	
Estudios cartográficos, topográficos e hidrométricos	Valoración de escurrimiento, y conocimiento de caudales promedio del río	6	
	Estudio de nivel de precipitación anual	2	
	Estudio de factibilidad geográfica	2	
	Dimensionamiento del predio (Información sobre el dueño del mismo)	1	
	Junta ejidal para la el trato y adquisición de los terrenos	2	
Trámites legales	Permiso de interconexión CFE	4	
	Permiso de CENASE y CRE	4	
	Permiso de generación CONAGUA	4	
Aceptación social	Platicas de información y descripción del proyecto en comunidades aledañas y la comunidad beneficiada	2	
Adquisición de terrenos	Compra del predio de construcción	4	
Adquisición de equipos	Cotización de turbinas, generadores y todo lo necesario para la central hidráulica	12	
Líneas de acceso	Construcción de líneas de acceso	2	
Preparación del sitio y construcción	Construcción de la obra de toma		8
	Construcción del canal de derivación		6
	Casa de maquinas		4
	Construcción del canal de desfogue		4
	Casa de maquinas Construcción del canal de desfogue	Instalación de las turbina y generador	2
		Instalación de los elementos auxiliares de la casa de maquinas	2
		Pruebas de arranque	4
Interconexión			1

- Proyectos asociados.

Durante la realización del proyecto se pretende la construcción de una brecha para el fácil acceso a la casa de máquinas para el mantenimiento de la misma y la construcción de esta, de igual manera se pretende que la brecha este óptimas condiciones para que los habitantes de la zona tengan acceso al cuerpo de agua, pues se pretende incentivar a la población para la explotación pesquera.

- Selección del sitio.

Dentro de los tipos de vegetación en la cuenca, cuenta con: bosque de pino-encino, bosque mesófilo, vegetación ripiara, pastizal inducido y cultivado. La parte norte del área, es actualmente un paisaje rural donde solo se observa remanentes de la vegetación original, y hacia el sur existe un pequeño segmento de vegetación de conservación natural.

- Ubicación física

La cuenca del río La Gavia es una de las más importantes del centro del estado de México, pertenece a la región hidrológica número 12, Lerma – Santiago, a su vez a la cuenca Lerma-Toluca, y a la subcuenca La Gavia, donde proporciona el 86.04% de total de suministro de agua en Almoloya de Juárez. La principal corriente de agua que alimenta al municipio, es el río La Gavia clasificándose como corriente de aguas perennes (18). La cuenca tiene una superficie de aportación de 505 km<sup>2</sup>, y geográficamente se ubica en el centro del país, dentro del cuadro de coordenadas 19°15' y 19°35' latitud Norte y 99°40' y 100°00' longitud Oeste.

- Vías de acceso.

La forma de ingresar al sitio de instalación es por la carretera que llega a la comunidad de Benito Juárez, y luego caminar por una brecha rústica alrededor de 30 m.

- Criterios de selección del sitio.

La región de La Gavia, dentro de la cuenca es la zona más baja, por ello se ve favorecida con buenas velocidades para la generación eléctrica, aunado a ello es una zona con baja densidad de especies únicas, por lo cual es factible la instalación sin causar un impacto mayor en la zona.

La zona analizada cuenta con un intervalo de proyección de energía hasta 200 kW, y características de escurrimiento perene a lo largo del año, así como disponibilidad media del recurso, ya que no se plantean obras de almacenamiento para aprovechamiento del mismo, y así evitar perturbaciones al medio. La zona resulta viable para el aprovechamiento energético por las características de flujo y velocidad del mismo, con funcionamiento a través de una turbina de eje lento y bajo caudal.

El río cuenta con bajos y casi nulos niveles de contaminación que pudieran llegar a afectar a la turbina dentro de la casa de máquinas, lo cual lo hace factible y rentable.

En cuanto a la contaminación del agua por la central, se hizo un estimado y este factor es minimizado de diferentes formas como más adelante esto se describirá.

### 3.5.2 Preparación del Sitio y Construcción.

Es esta sección se presenta una descripción general de las actividades que se pueden llegar a implementar para que la construcción del aprovechamiento hidráulico tenga el menor impacto ambiental posible.

- Preparación del terreno.

Para la preparación del terreno de la casa de máquinas es necesario adecuar el lecho del río mientras que para la implantación de la obra de toma, se pretende la remoción de tierra del lugar.

Para preparar el terreno de descarga se construirán cimientos de concreto y piedra en puntos estratégicos lo cual significa remover algo de vegetación.

- Equipo utilizado

Máquinas de excavación, retroexcavadoras, aplanadoras, camiones de carga, grúa, moto-sierras, martillo hidráulico.

El principal problema de la maquinaria a utilizar es la contaminación auditiva, la cual puede perturbar el orden del ecosistema en su momento, así como el riesgo que se expone a la fauna del lugar con el paso constante de los vehículos pesados durante la construcción.

- Materiales requeridos

Los materiales para la construcción de la casa de máquinas, para la obra de toma y para la estación elevadora de voltaje se traerán de Toluca y de comunidades aledañas, tratando de utilizar aprovisionamientos de negocios locales. Para este caso, se necesita un cableado HMF resistente a la corrosión, ya que es una zona muy cercana a humedales previos a la presa. En la **Tabla 15** se enuncian, la cantidad, y origen de los materiales requeridos.

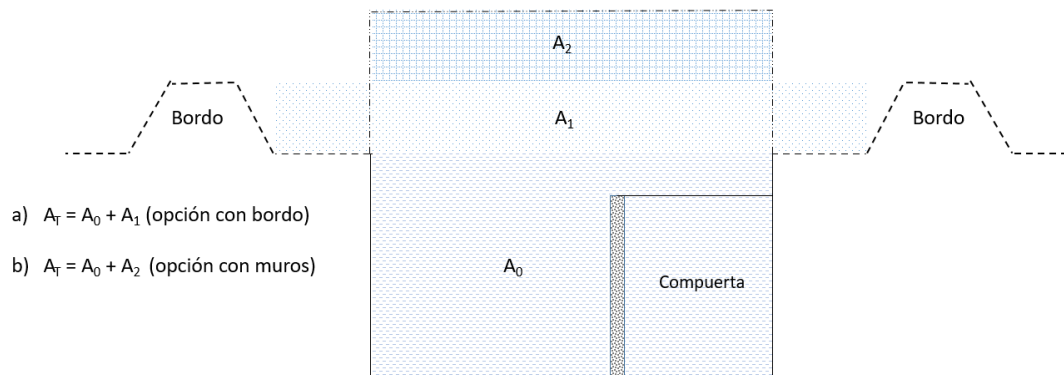
- Obras y servicios de apoyo

Con el respectivo análisis realizado en la modelación en Hec-Ras, se observó que los eventos extraordinarios de caudales máximos hidrométricos, caudales a un  $Tr = 50$  con el método racional y los caudales máximos extraordinarios a partir de los datos hidrométricos, la sección análisis (5 km) presenta tirantes de desbordamiento a partir de la sección, por lo que se recomiendan diferentes soluciones:

- Corregir pendiente.
- Desazolve del río
- Limpieza de taludes.
- Aumento de hombros
- Revestimiento de taludes

Donde las más viables resultan el desazolve y limpieza de taludes, ya que requieren una menor inversión económica y de esta forma reajustar el coeficiente de Manning dentro de la sección de análisis, la **Figura 95** se muestra un esquema general para el aumento de bordos en las secciones, para dar mayor viabilidad al aprovechamiento hidráulico en época de avenidas, que permitan aumentar el área hidráulica, y que a la vez, mantengan el gasto circulante dentro de ella. Se pueden proponer varios escenarios y evaluar su viabilidad ambiental, esto con el fin de estar seguros que el

problema de inundación del canal, no se envía otras zonas aguas arriba o abajo del punto seleccionado. Pero dado que el comportamiento de desbordamiento es constante en todo el río resultaría costoso, al igual que el revestimiento de taludes.



**Figura 95:** Aumento de hombros en la sección

**Tabla 18:** Descripción de los materiales de construcción.

Nombre del material	Características generales	Origen	Forma de transporte
Arena	Tiene capacidad para reducir las fisuras que aparecen en la mezcla al endurecerse.	Casa de materiales de la región. Se mezclará con la tierra removida de la construcción del brecha de acceso	Góndolas
Piedra	Resistente a la tensión	Mina de piedra cercana	Camión de volteo
Grava	Resistente y sólida mecánicamente, completamente libre de partículas contaminantes que pudieran afectar el tiempo y calidad de fraguado del concreto.	Casa de materiales de la región	Camión de volteo
Concreto compactado con rodillo	Compactado y curado en sitio. El concreto compactado con rodillo es un concreto de cero revenimiento con resistencia a la abrasión para soportar agua a alta velocidad.	Casa de materiales de la región	Plataforma de tráiler

Varilla de acero (2")	Mejoran la adherencia a los materiales aglomerantes e inhiben el movimiento relativo longitudinal entre la varilla y el concreto que la rodea.	Casa de materiales de la región	Plataforma de tráiler
Madera para construcción	Sirve para la cimbra y otros elementos auxiliares.	Casa de materiales de la región	Camión convencional de carga
Cableado HMF (12")	Para interconexión, y el cableado necesario para el transporte de la energía generada.	Proveedor especializado	Camión convencional de carga

Los servicios de apoyo que se toman en cuenta que llevar comida diariamente a los trabajadores, se contratará a tres locatarias que se encarguen de preparar y hacer llegar la comida a la obra, esto permitirá ahorro de tiempo en la construcción ya que se construirá una zona provisional de comedor.

Se contará con un estanquillo el cual funcionará como enfermería para en caso de un accidente menor en la obra.

- Personal utilizado.

Se contratarán trabajadores del lugar para la obra, esto incluye a ingenieros especializados en el tema, veladores y obreros. Los obreros del turno matutino trabajaran de 8:00 a 14:00 hrs, mientras que el segundo turno será de 14:00 a 20:00, ambos turnos contarían con un descanso de 30 minutos. Se pretende que la obra duré seis meses. Mientras que los veladores estarán de las 20:00 a las 8:00 del día siguiente.

Para el caso de los ingenieros especializados se emplearán por un año, ya que esto incluye la supervisión de la obra una, la puesta en marcha y la evaluación de su desempeño durante la operación cotidiana.

- Requerimientos de energía.

Para satisfacer la demanda de energía dentro la obra, es posible instalar un generador de electricidad a base de gasolina o diésel, lo que servirá para alimentar luminarias internas y externas, permitiendo facilitar la vigilancia del sitio durante la noche, así como suministrar la energía eléctrica necesaria al campamento en general. Cabe mencionar, que la planta generadora a utilizar deberá cumplir con la normatividad ambiental correspondiente al control de emisiones necesario para su buen funcionamiento.

Adicionalmente, se instalará una central móvil de mayor potencia, para solventar los requerimientos energéticos de la estación de construcción como son: soldadoras, sierras y de más herramientas electromecánicas. Lo más viable es la contratación de una central a base de diésel, de tamaño



compacto pero de gran potencia, cuyo control de emisiones atmosféricas deberá llevarse con mayor rigurosidad, atendiendo de manera inmediata el mantenimiento que sea necesario.

- Requerimientos de agua.

Para evitar la contaminación del río durante la construcción, se pretende traer agua tratada para uso en baños y lavado de maquinaria y equipos grandes. Mientras que para las mezclas en el concreto será posible utilizar agua del río, tratándola únicamente con un filtro para partículas suspendidas. No se pretende utilizar más agua en otras actividades, y es factible que no se cause daño a la calidad del agua del río ni al entorno que la utiliza.

- Residuos generados.

Durante la evaluación y construcción de la pequeña central hidroeléctrica, se generan una serie de residuos de distintos tipos, en breve se describe de manera general los residuos generados en estas tres principales etapas y la solución que se tendrá con estos.

- Etapa de evaluación:

Mientras se realice la evaluación de terrenos y predios que se toman en cuenta para la construcción de la pequeña central hidroeléctrica, se generan residuos sólidos simples de consumo humano, principalmente de manera individual, tales como empaques de comida primordialmente. Dichos residuos serán responsabilidad de la persona y tendrán que llevarlos consigo hasta encontrar un depósito de basura.

Adicional a esto, deberá haber personal de intendencia durante los turnos de trabajo, es posible que sea solo una persona que pueda completar todas las labores relacionadas con esta actividad.

- Etapa de construcción:

En esta etapa es donde se genera una mayor cantidad de residuos, los cuales tendrán diferentes destinos una vez que la vida útil de estos ya haya terminado.

Los residuos que se generen serán por parte de los trabajadores en general, primordialmente por las aguas negras de los baños, las cuales serán drenadas cada 2 días para llevarse a la planta de tratamiento de aguas más cercana. Los residuos generados por el campamento, en la zona de comedor y de dormitorios, serán separados en orgánicos e inorgánicos. De tal forma que se pueda disponer de ellos por medio del servicio municipal de limpia que opera en la comunidad de Benito Juárez. Cabe mencionar, que la generación de estos será de manera individual de cada trabajador, por lo cual será su responsabilidad y deber colocarlos en su lugar, de no ser así se tomarán soluciones alternas.

Para los residuos generados por las máquinas de la construcción, como las retro excavadoras y camiones de volteo, que pueden llegar a generar aceites residuales durante su mantenimiento. Éstos deberán ser responsabilidad de la empresa contratista dueña del equipo, quien tendrá que establecer por escrito en su contrato de obra, cómo dispondrá de este tipo de residuos.

Mientras que para los residuos de la construcción en sí, por ejemplo cemento, madera, clavos, etc., deberán ser recolectados por la misma empresa constructora y asegurarse de que serán llevados a una disposición adecuada, esto según las características de cada tipo de residuo. Con estas acciones se pretende disminuir el impacto ambiental,

- Etapa de operación de la construcción:

Durante la etapa de operación se generarán principalmente residuos por la casa de máquinas, tales como: aceites, que se acumularán en tambos y se llevarán a disposición, material para limpieza, tanto consumibles como enceres adecuados, y en su momento algunas piezas de cambio. Todo ello, dependiendo de su naturaleza, se deberá decidir cuál es la mejor forma de disposición final para cada uno.

### 3.5.3 Operación y Mantenimiento.

Para esta etapa se plantean diferentes elementos que se consideran necesarios para que la operación en diferentes horizontes de tiempo afecte lo menos posible al ambiente. En la **Tabla 16** se muestra una lista general de los insumos para la operación y mantenimiento diarios. Mientras que en la **Tabla 17** se enlistan los residuos generados, el impacto que tienen y las posibles medidas de mitigación

**Tabla 19:** Materias primas e insumos del proyecto.

Fase del proyecto	Materias primas	Insumos
Construcción	Agua, gasolina, diésel, aceite de transmisión, líquido para frenos, madera, piedra, grava, cemento, aluminio, metal, varilla de hierro colado, soldadura, energía eléctrica, clavos, alambrón, costales con arena, cableado de alta y baja tensión.	Equipo de cómputo, planta generadora de electricidad, soldadoras, mezcladora, palas picos, martillo hidráulico, retroexcavadoras, martillos, grúas, compresores, equipo de cómputo, herramienta, equipo mecánico y eléctrico.
Operación	Gasolina, diésel, aceites para el mantenimiento,	Aceite Dieléctrico para los transformadores de la interconexión, como fluido refrigerante y de protección. Refacciones para cada máquina Combustible mensual Herramientas en general Lubricante mensual

- Programa de operación

Para mantener el correcto funcionamiento de cualquier instalación, es necesario un buen mantenimiento constante y detallado de cada uno de sus componentes. La instalación tiene una vida

útil de alrededor de 30 a 35 años, manteniendo una modernización continua de componentes para mantenerla en óptimas condiciones.

- Acciones de programa de operación:
  - Diariamente uno de los técnicos contratados especialista en mecánica, tendrá que entrar a la casa de máquinas a revisar el estado de los componentes encargándose que estos estén limpios y en buenas condiciones, si esto no fuera así, se le avisaría al ingeniero a cargo para que tome medidas.
  - Semestralmente se hará cambio de aceites dieléctricos y de transmisión según sea el caso.
  - La caja de multiplicación será remplazada después de que termine su vida útil.
  - El encadenamiento se remplazara cada 1 año y medio.
  - En la sala de control se instalarán softwares especializados para control de anomalías en equipos como los de la casa de máquinas.
  - En la medida de lo posible, la turbina se reemplazará después de 20 años de servicio, pues se tiene que tener en cuenta la constante modernización y según las proyecciones de los estudios hidrométricos, el caudal del río tenderá a ser mayor.
  - Los engranajes serán sustituidos cuando el técnico a cargo lo indique, ya que según el programa de mantenimiento preventivo, se realizarán visitas de inspección de acuerdo a las especificaciones que el fabricante de los equipos establezca
- Requerimientos de energía.

El consumo eléctrico promedio por mes de una planta hidroeléctrica como la descrita en este proyecto, dependerá de la cantidad de equipos de control de esta, y otros como equipo de cómputo sensores, cámara de vigilancia, luminarias internas y externas.

Para ello se realizarán los trámites necesarios como pequeño productor ante la Comisión Reguladora de Energía y establecer un contrato de interconexión con la CFE. Para un mediano plazo, podría estudiarse la posibilidad de un sistema híbrido para generación de electricidad. Dentro de esta opción se deberá llevar a cabo un estudio de velocidades de viento a diferentes alturas, o de la irradiancia solar del lugar, ambas a lo largo del año. De esta manera sería posible tener mayor certeza del potencial de aprovechamiento eólico y/o solar fotovoltaico.

Actualmente en nuestro país, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) es la encargada de otorgar los permisos necesarios para poder generar electricidad e interconectarse con la red de la CFE. Para ello se sigue un procedimiento ya establecido según el tamaño de la instalación, que en este caso sería un permisionario pequeño productor.

- Requerimientos de agua.

Los requerimientos de agua durante la operación y mantenimiento serán mínimos, tal que una parte de ellos serán solventados con el agua del río, donde se instalará una cisterna y una bomba de agua que se dirija a los sanitarios y una pequeña toma de agua, el volumen de este requerimiento aún está

por estimarse. Se pretende el uso de “baños secos”, con la adecuada disposición de las excretas que se generen.

Cabe mencionar que el sanitario se colocará con una fosa séptica, la cual se encontrará a una distancia considerable del cuerpo de agua, tal que cada cierto tiempo (aún por definir) se vaciará por medio de bombeo contratando una empresa especializada en ese tipo de servicios.

- Emisiones a la atmosfera:

Durante la operación no se pretende emitir contaminantes a la atmosfera. Mientras que en la fase de construcción sí se generarán bastantes emisiones por parte de la maquinaria utilizada, pero que estarán bajo control ya que la empresa constructora se deberá comprometer por escrito para que todos los equipos que utilicen combustibles fósiles cumplan con la normatividad de emisiones de fuentes fijas y móviles.

- Aguas residuales:

No se pretende generar aguas residuales de origen industrial, solo se tendrán aguas turbinadas, las cuales no requerirán tratamiento alguno al no alterarse su calidad con contaminantes durante el proceso de generación de electricidad.

**Tabla 20:** Generación de residuos en las fases de obra, impactos y mitigación.

Fase	Residuos		Impacto	Destino	Mitigación
Evaluación del recurso	Emisiones a la atmosfera	Vehículos automotores emitiendo gases de efecto invernadero para la evaluación del sitio y viabilidad de implantación del proyecto	Con el paso contante de este tipo de vehículos emitirán un cantidad de gases de efectos invernadero, lo cual ocasionara acumulación de estos en la zona sin embargo esto no es tan grave ya que será en poco tiempo	-	Para evitar en gran medida esto, se utilizara un solo vehículo para transportar a todo el personal que es necesario para evaluar esta parte del proyecto.
	Aguas residuales	Para esta parte no se pretende la creación de aguas residuales	-	-	-

	Residuos sólidos domésticos	Empaques de comida y agua embotellada	Estos generan un impacto si son desechados en la zona al no ser orgánicos sin embargo como serán responsabilidad del consumidor no debe de existir un impacto mayor	Tiradero o bote de basura dentro de la comunidad para que el municipio o comunidad se encargue de su tratamiento	Se pretende ayudar al municipio con la compra de dos camiones recolectores de desechos domésticos para transportarlos a las plantas recicladoras correspondientes o darles un rato más adecuado.
Construcción del proyecto	Emisiones atmosféricas	Vehículos para el transporte de material y personal dentro de la obra	-	-	Plantar 200 árboles en la zona una vez terminada la construcción.
	Aguas residuales	Drenaje de los baños, y agua utilizada para la construcción	Posible contaminación del subsuelo	Fosa séptica	Bobeo de la fosa y llevar el agua a una planta tratadora de agua en la localidad
	Residuos industriales	Aceites	Contaminación del manto acuífero	Tanque de almacenamiento, y planta degradadora de aceites	Inversión del 5% en el mejoramiento de la planta tratadora de aceites
		Madera de construcción	A pesar de que es un residuo orgánico el cual se degrada con el tiempo	Aserradero de la localidad más cercana	Se donarán un insumo de 1500 árboles a Probosque para su campaña anual de reforestación
		Residuos de cemento	Contaminación del suelo y el manto acuífero	Planta fundidora	Aún no se contempla
		Residuos metálicos	Contaminación del suelo y manto acuífero y muerte de peses	Planta fundidora de metal de tabasco	Mantener el área libre de este tipo de residuos para evitar muerte de animales o accidentes laborales, y optimizar el uso de este tipo de componentes

		Vehículos automotores para el transporte de personal.	Emisión de gases de efecto invernadero	-	
Operación de la planta	Emisiones	Producción de vapor de agua	Este fenómeno es inevitable al poner en marcha el proyecto, sin embargo no representa un afectación mayor	-	Construcción de muros verdes en las zonas aledañas.
	Domésticos	Residuos en la hora de la comida	Contaminación en general	Botes de separación en orgánicos e inorgánicos	Correcto manejo de estos al dejarlos a la disposición del municipio
	Industriales	Aceites	Contaminación del manto acuífero	Tanque de almacenamiento, y planta degradadora de aceites	Inversión del 5% en el mejoramiento de la planta tratadora de tabasco donde son degradados estos aceites

- Residuos sólidos industriales:

Durante la operación y mantenimiento de la planta se generaran residuos de aceites, que se utilizan para el multiplicador y para la flecha de la turbina, estos sólidos o semisólidos de lubricación, serán recolectados por la empresa encargada del mantenimiento preventivo, y será su responsabilidad la adecuada disposición de los mismos.

- Residuos sólidos domésticos:

Los residuos domésticos generados en la planta será por parte de los trabajadores una vez que comience la operación, estos serán responsabilidad de cada uno de ellos en donde ellos tiene que mantener el área de trabajo en correcto funcionamiento y óptimas condiciones de limpieza. De esta manera, deberán de ser capaces que cada dos o tres dichas lleven a los servicios municipales más cercanos, estos sólidos domésticos generados.

- Niveles de ruido Intensidad del ruido (dB) y duración.

Durante los 6 meses de construcción de la planta, se tendrá un nivel de ruido en un grado de 90 dB por lo cual causará algunas perturbaciones para el ecosistema. En este caso, por protección de los trabajadores se les obligará a utilizar tapones en los oídos.

Durante la operación de la planta se tendrá un nivel de ruido de 60 dB a 70 dB aproximadamente, los que será perceptibles cuando se encuentra alrededor de 50 metros cerca de la planta, por lo cual no presenta un riesgo mayor, sin embargo podrá causar un desequilibrio en los ecosistemas, pero de

acuerdo a como lo registra la EPA, los animales y ecosistemas tiene una capacidad de adaptabilidad de alrededor de 1 año en algunos caso es menos, así pues se puede decir que esto no ocasionará pérdida de vida silvestre en los alrededores o en la misma zona donde se encuentra la planta generadora.

Cabe mencionar que la construcción de la casa de máquinas, deberá incluir paneles con aislante térmico y auditivo, esto con el fin de minimizar el nivel de ruido al exterior. Se considera que este tipo de materiales no encarecerá el costo de manera significativa, de lo cual se podrá tener certeza en el momento de hacer su especificación.

#### 3.5.4 *Abandono del Sitio*

La vida útil de una central hidroeléctrica puede variar de acuerdo a su mantenimiento, para el caso de este proyecto se pretende una vida útil de 35 años, pero se pretende extender esta un más pues se irán sustituyendo y modernizando los componentes para la generación incluyendo la turbina, sin embargo en este apartado se describe un plan hipotético de las medidas que se podría llegar a tomar para el abandono del sitio.

Primero es notificar a la CFE y a la CRE que ya no se generará energía eléctrica, es decir, que la central saldrá de operación de forma permanente. De tal forma que personal especializado determine si es necesario implementar alguna medida extraordinaria para suplir el abastecimiento eléctrico que se dejará de aportar. Después de ello se avisará al correspondiente encargado de proyectos de este tipo en el municipio de Almoloya de Juárez y a la delegación de Benito Juárez, redactando una carta de motivos del por qué el sitio será desmontado u abandonado. Así la empresa encargada de la construcción de esta central, podrá comenzar las obras de desmontaje de cada uno de los componentes y tomar decisiones sobre ellos, tiene que dejar el sitio en óptimas condiciones como si esta nunca hubiera estado ahí.

Primero se tendría que desinstalar la casa de máquinas y tomar decisiones sobre los componentes electromecánicos de generación, como si tiene aún vida útil o es mejor fragmentarlos para que estos puedan ser aprovechados por piezas o reciclados, pues contiene grandes cantidades de materiales, en este caso metales fáciles de reutilizar en algunos otros procesos después de su fundición.

Se desinstalarán los diques de la misma con el menor impacto posible, con el caso del cuarto de control ocurrirá algo similar, se desinstalará por completo.

Para el caso de las líneas eléctricas, se desconectarán y CFE se hará cargo del cableado, la empresa constructora del proyecto tiene que gestionar esto.

La zona se reforestará con especies endémicas de la región y dejar el ecosistema casi intacto, de hecho, se podría hacer una mejora al sitio. Ya que al ser zona agrícola con cultivos y pastizales para ganado, se podrán sembrar árboles, tales como Sauces o alguna especie de Pino adecuada para la región, según lo determine un especialista.

De igual manera para el canal de conducción, tendrá que ser rellenado de nuevo, de tal forma que se deje libre el caudal del río como lo era antes de la instalación del proyecto.

El costo de realizar el desmontaje de toda la instalación podría provenir de diferentes fuentes, por un lado, por el Municipio de Almoloya de Juárez. También por un fideicomiso que se puede abrir al momento de iniciar operaciones y ahorrar en él un pequeño porcentaje de la venta de electricidad.



# Capítulo 4

## 4. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se describen las conclusiones más relevantes del análisis de resultados obtenidos a lo largo de este estudio, en los distintos apartados que lo conforman.

La zona analizada cuenta con un intervalo de proyección de energía hasta 200 kW, y características de escurrimiento perenne a lo largo del año, así como disponibilidad media del recurso, ya que no se plantean obras de almacenamiento para aprovechamiento del mismo, y así evitar perturbaciones al medio. La zona resulta viable para el aprovechamiento energético por las características de flujo y velocidad del mismo, con funcionamiento a través de una turbina de eje lento y bajo caudal.

Los métodos teóricos para el cálculo de caudales a partir del análisis de precipitación, permiten realizar estimaciones en distintos escenarios en diferentes periodos de retorno, sin embargo, para obtener resultados más acercados a los datos históricos, y de esta forma evitar sobredimensionamientos, es importante realizar un análisis de los puntos de referencia para el trazado de cuencas de estudio. Como se sabe el área y pendiente de las mismas, son factores de relevancia en los distintos cálculos, siendo los más sensibles en la manipulación de las fórmulas, ya que el método seleccionado puede subdimensionar los caudales, o sobredimensionar los mismos.

Los métodos teóricos de cálculo de caudal aplicados en este trabajo, permitieron identificar el más viable para un estudio de prefactibilidad energética. En el caso del *método racional* subdimensiona los caudales en un rango del 35 al 40% con respecto a los medios hidrométricos conservándolos dentro de intervalos normales de comportamiento estadístico de registros históricos de caudal. El método SCS muestra intervalos uniformes en el comportamiento anual a distintos periodos de retorno, sin embargo, al tener valores de caudal bajos, la estimación energética es menor, dejando de lado el potencial total del río. Para el caso del *método SCS*, como segunda aproximación sobrestima los caudales, hacia el intervalo estadístico de máximos históricos, hasta un  $Tr = 10$  años, de esta manera compromete mayor energía, sin embargo, al dar una proyección energética significativa, resulta favorable como primera aproximación de aprovechamiento con respecto al método racional, ya que este último muestra un caso más desfavorable en producción energética.

El método SCS, muestra una sobrestimación de caudales principalmente para el caso de los meses de avenidas de un 50% comparado con los medios hidrométricos. Por lo que los cambios entre los periodos de retorno no son uniformes, lo que afecta la aproximación específica del caudal, de tal forma que se establece que el método racional puede ser utilizado como primera aproximación y no dará una viabilidad favorable energéticamente, mientras que el método SCS, ampliará el intervalo energético.

En la evaluación espacio-temporal, con el análisis de distintos datos y escenarios de caudal, se puede determinar que el río sufre mayores rangos de desbordamientos en zonas aledañas a la presa. Este comportamiento se observa principalmente en los periodos de retorno de 20 y 50 años, por lo que es necesario generar obras de protección y análisis de suelo por sedimentación en la desembocadura de la presa.

Con el análisis de comportamiento de área, velocidad y caudal en la zona de estudio, se observó que la zona óptima para el aprovechamiento energético del río es la número 3720, la cual se encuentra a 3.72 km aguas arriba de la presa, a la altura del puente Benito Juárez perteneciente a la misma comunidad. Dada las características geográficas y sociales del sitio, tales como la cercanía al poblado y a la red principal de alta tensión, se determinó que la zona es adecuada para la interconexión de un aprovechamiento hidroeléctrico.

Se muestra que la zona propuesta para el aprovechamiento energético tiene un comportamiento uniforme de flujo, en cuestión de velocidad a lo largo de un tramo de 1.5 km y durante todo el año, siendo dicho comportamiento más confiable por un tramo de 250 m, por lo que dichas zonas pueden ser utilizadas para el análisis de obras de toma en aprovechamientos energéticos, cuyas velocidades promedio están en el intervalo de 1.5 a 2 m/s en temporada de estiaje y avenida, respectivamente. Además, no se tienen zonas de inundación que lleguen a perturbar el flujo, salvo aquellos eventos extraordinarios en los que se cierra la descarga en la presa para inundar las tierras para siembra.

Es recomendable el uso de datos históricos con fines prácticos de comportamiento del caudal en las zonas de estudio, a partir de estaciones hidrométricas cercanas a la zona y con datos aforados, siendo estos últimos los que demuestran el comportamiento específico de la zona de análisis. Entre los datos históricos y los datos hidrométricos se tiene alrededor de un 89% de similitud para el caso de caudales medios.

La zona elegida para el aprovechamiento hidroeléctrico cuenta con buen índice de energía de flujo oscilando entre 5 a 35 kW para un periodo de retorno de 20 años, valores obtenidos con el método racional. Siendo este el escenario más subdimensionado de caudal, evitando así una sobrevaloración energética del flujo.

De acuerdo a la caracterización de la obra de toma diseñada en este trabajo, la energía máxima se puede generar con un tirante de 1.6 m, con un valor de igual magnitud. En él, se toman en cuenta los caudales de un rango actual, es decir, los hidrométricos analizados con los respectivos caudales ecológicos.

El flujo alcanza una velocidad máxima de 3.5 m/s, por lo que es necesaria la elección de una turbina de eje lento a tirante mínimo para la producción hidroeléctrica. La longitud del canal se recomienda de 30 m, mientras que el muro que divide los caudales tiene una longitud de 26 m totales, para así lograr una estabilidad del flujo y reducir los efectos de turbulencia a la entrada y la salida del canal.

El diseño de la obra de toma, soporta los caudales en avenida máximas respetando un tirante de 1.6 m, garantizando la protección de la obra de toma para la turbina, en casos extremos de caudal.

De acuerdo con los valores de caudales obtenidos a partir del análisis de estaciones hidrométricas, se obtuvo un comportamiento entre 0.13 y 1.60 m<sup>3</sup>/s. Tal intervalo tiene un índice de crecimiento hacia temporadas de avenidas a partir de las de estiaje del 8.1%. El escurrimiento medio anual total se registra en un valor de 7.34 m<sup>3</sup>/s, donde los meses de Junio a Septiembre aportan el 69.74% del caudal total anual, es decir el triple que aportan los meses de estiaje, por lo que se puede afirmar que el río tiene un comportamiento de escurrimiento perenne a lo largo del año.

De acuerdo con el análisis y modelado de los resultados de las estaciones con el método racional, la que resultó más adecuada fue la estación meteorológica “Los Velázquez”, principalmente por la caracterización de datos, es decir, la uniformidad de los mismos, y la cantidad de datos faltantes era mínima, lo que permitió tener tamaños de muestra mensuales más grandes, facilitando el trabajo de análisis estadístico de datos.

Con la aplicación de métodos teóricos de cálculo de caudales a partir de la caracterización de datos de la estación meteorológica seleccionada, se determinó que para el caso del método racional, tomando de parámetro de comparación los caudales obtenidos con un  $Tr = 2$  años, la diferencia de caudales obtenidos entre las dos subcuencas es de aproximadamente 16.5% aproximadamente, siendo mayor en el caso de la subcuenca de la zona B. La similitud de datos proyectados con los datos históricos medios analizados es del 79% con respecto a los resultados de la subcuenca B. Se tomaron en cuenta, principalmente los resultados a partir de la zona B, ya que en esta zona se encuentra el tramo específico de batimetría analizada, así como la sección elegida para el posible aprovechamiento hidroeléctrico.

El método HMS-SCS tiene una similitud de datos del 70% a un  $Tr = 2$  años, comparados con medios hidrométricos históricos analizados, esto para los meses de avenidas. Sin embargo, en los meses de estiaje la similitud de datos radica en un 76% entre ellos, la diferencia de resultados obtenidos entre subcuencas es del 16%, teniendo un salto promedio de caudal entre periodos de retorno para cada subcuenca equivalente a 0.77 unidades por arriba de cada periodo anterior.

Los datos medidos *in situ* para este trabajo son puntos de referencia, que resultaron ser básicos para determinar la validación de los modelos teóricos desarrollados. El rango de similitud con respecto a los históricos es del 85%, el cual modifica al efecto de avenida media y a la canícula. Lo que permitió observar el comportamiento exacto actual del río, ya que en los meses de marzo y abril cierran la compuerta de la presa, ocasionando inundaciones en determinadas zonas del río para el aprovechamiento de riego.

En el análisis de la modelación hidráulica de los 75 gráficos resultantes de los elementos estudiados, se observa un comportamiento de velocidad a lo largo de los seis periodos de retorno entre 1.5 y 2 m/s, con picos constantes aún en temporada de estiaje, esto para las zonas marcadas con potencial de aprovechamiento hídrico. Sin embargo, el flujo muestra mayor velocidad conforme el caudal aumenta, incrementándose de igual forma el área húmeda. Al cambiar dicha área con respecto al caudal mensual, oscila entre 2 y 10 m<sup>2</sup> en la zona de análisis de prefactibilidad, esto en el estudio de caudales medios de comportamiento actual.

Para el caso de análisis de energía y potencia, se tiene un escenario mínimo, medio y máximo del caudal actual, el comportamiento de energía específica oscilante entre 0.22 a 1.90 m, es decir, entre los tres rangos de caudal establecidos, se tiene un aumento promedio del 34% para cada uno. Esto implica que se encuentra en un margen de aprovechamiento óptimo de energía específica de flujo, sin embargo, al evaluar la energía en forma de potencia aprovechable del flujo, existe una diferencia de alrededor de 200 kW para el mes de Julio utilizado con fines comparativos, por lo que se tiene un intervalo de 5 a 200 kW, clasificándose como oscilante en extremo, por lo que con la propuesta de obra de toma, se pretende mantener un rango específico de potencia aproximada.

Respecto a la energía analizada a partir de los caudales resultantes del método racional, en la cuenca de la zona A, se tiene una energía para un  $Tr = 20$  para el mes de Julio, de 1.10 m. Mientras que para la subcuenca de la zona B se tiene un equivalente de 1.20 m en energía específica, lo cual traducido a potencia, es equivalente a 37.5 y 50 kW, respectivamente. Es decir, se tiene una diferencia de 12.5 kW, que equivale al 25% de diferencia con respecto a la zona B, lo que se debe principalmente al factor de área y longitud de la red hídrica principal.

Con el método HMS-SCS para el mismo mes y mismo periodo de retorno (20 años), para la subcuenca A se tiene una energía de 1.90 m y una potencia aproximada de 140 kW, mientras que para la subcuenca de la zona B se tiene una energía de 2.1 m y una potencia de 180 kW, es decir 40 kW de diferencia entre subcuencas. Es una diferencia de 33% de energía, por lo que con esto se

establece, que el método racional compromete menos energía si no se cuenta con el acceso adecuado a los datos de características morfológicas de la zona de estudio, ya que la aplicación del método SCS, sin las características adecuadas del punto de estudio, podría comprometer la generación energética.

Entre los métodos de estimación de caudal, respecto a los resultados obtenidos de la modelación de la subcuena B, se tiene una diferencia en energía de 0.8 unidades, siendo mayor el resultado del método SCS, y con respecto a potencia se tiene una diferencia del 30% entre el dimensionamiento de potencia, esto para los meses lluviosos.

El diseño de obra de toma permitió el análisis comportamiento de energía de la misma bajo criterios de flujo crítico, donde los caudales de comportamiento anual mensual convergen en una energía máxima de 1.6m a un tirante de la misma magnitud, esto quiere decir que sin importar el mes de avenida o estiaje mientras se alcance el tirante máximo la energía convergerá en un mismo punto.

El análisis a flujo crítico del canal de generación establece un rango de tirantes de entre 0.092m y un máximo de 0.352 m, para una energía mínima entre 0.18 y 1.31 m respectivamente, es decir que el comportamiento de caudal de cada uno de los meses se encuentra restringido por el rango obtenido.

El análisis a flujo uniforme de la obra de toma permitió establecer un rango de operación actual de caudal que va de 0.17 a 1.54 m<sup>3</sup>/s, y un rango de operación a un Tr = 20 años que se encuentra entre 0.65 y 4.22 m<sup>3</sup>/s este último bajo los resultados establecidos por el método racional, ya que al tener un rango de caudal menor, describe un comportamiento estable de generación de energía, garantizando así bajo el evento de probabilidad.

El rango máximo de velocidad establecido es de 3.57 m/s para un comportamiento de tirante máximo diseñado (1.6 m), por lo que favorece al aprovechamiento energético de flujo.

En el caso de la modelación 3D, dada las características del canal diseñado a flujo uniforme y lo observado en el software, este soporta la avenida máxima con un caudal de 49.25 m<sup>3</sup>/s totales, siempre y cuando, se tenga una abertura de compuerta equivalente a 1.35 metros para que se respete el tirante máximo en el canal de generación, dejando una tolerancia de 15 cm al tirante máximo permisible en el canal de desfogue, evitando inundación y riesgo en la zona.

La reducción de turbulencia se logró al disminuir el tamaño del muro a lo largo del canal, para que el flujo tome un comportamiento casi uniforme antes de llegar a la zona de división de flujo, esto inicialmente con un análisis de comportamiento de velocidad en el canal, con el respectivo análisis general en las zonas de restablecimiento de flujo se determinó que la turbulencia no tiene una afectación mayor de acuerdo con las características del diseño geométrico del canal, sin embargo resulta importante disminuir la zonas de nula velocidad que se observan el muro, esto podría si el canal fuera más ancho sin embargo se comprometería la velocidad en el mismo.

Con el análisis y correcciones sobre la obra de toma, para los rangos de operación actual y a un Tr = 20 años, se lograron determinar intervalos de velocidad y la ubicación potencial de la turbina. Dichos rangos se encuentran entre 0.6 a 1.24 m/s y 1.70 a 2.26 m/s, por lo que se concluye que la velocidad tiene un comportamiento ascendente al igual que el caudal, favoreciendo el incremento de generación eléctrica.

Al realizar el respectivo análisis de turbulencia, principalmente en el escenario de un Tr= 20, se determinó que esta no tiene influencia representativa sobre el canal de generación, por lo que no

compromete al flujo, el intervalo de turbulencia se encuentra entre 0.82 a 1.18 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, representada principalmente en la zona de división de flujo y en el canal de desfogue.

Los análisis de comportamiento de velocidad de flujo y turbulencia, se concluye la ubicación de la turbina a una distancia de ocho metros después del inicio del muro del canal, esto con la finalidad que se desarrolle de manera correcta la velocidad en la longitud de canal hasta el punto de ubicación de la turbina, la cual potencialmente se puede ubicar a una distancia de 15 metros de inicio del muro de división de canales.

Las turbinas comerciales analizadas, su selección se basó primordialmente en la capacidad de generación, y las características geométricas de la misma, la turbina que resulta óptima para generación a pequeña escala es la turbina Smart Free, pues tiene una capacidad de generación mayor, el precio de la misma es un 5% mayor que la marca Indérgie, sin embargo esto compensa con el rango de generación, así pues para alcanzar el óptimo desempeño de generación de esta turbina se propone la implementación de un vertedor para aumentar el tirante en el canal de generación ya que la turbina bajo condiciones de operación actual tendía un desempeño mínimo de aproximadamente 700 W.

La Turbina Indérgie, es una opción viable dadas las características mínimas de perturbación al flujo por lo que se propone la instalación de 2 turbinas de estas características, o 4 de ellas para aumentar la producción, sin embargo, dado el precio de la misma aumenta la inversión, mientras que la generación energética resulta casi equivalente a dos turbinas de la compañía Smart Hydro Power, por lo que se concluye que esta última es la turbina con mejor desempeño, y menor costo de inversión.

Con respecto a la viabilidad ambiental del presente proyecto, se establece que es compatible con el entorno de la zona donde se propone implementar, ya que el uso de maquinaria para su construcción no afectaría permanentemente a la región, mientras que la operación de la pequeña central, tendría un mínimo de impacto ambiental debido a su tamaño y a las nulas emisiones al ambiente.

Como recomendación general para obra de protección hidráulica, es necesaria la limpieza de talud de río y desazolve de la zona, ya que esta no soportaría eventos extraordinarios máximos registrados para periodos de retorno mayores a 50 años.

## REFERENCIAS

1. **Poder Ejecutivo Federal.** Ley de Aguas Nacionales. [En línea] 24 de 03 de 2016. [Citado el: 22 de 04 de 2018.] [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16\\_240316.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf).
2. **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).** *Estadísticas del agua en México*. Coyoacán : s.n., 2016. págs. 28, 243.
3. **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) / Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).** *Programa Nacional Hidrico*. Coyoacán : s.n., 2014-2018. pág. 24.
4. **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).** *Atlas de agua en México 2016*. Coyoacán : s.n., 2016. págs. 14, 20, 49, 57.
5. **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** *Anuario estadístico y geográfico de México 2016*. Aguascalientes : s.n., 2016. págs. 4,5,46,954. ISBN 978-607-739-978-0..
6. **Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU).** *Atlas de Riesgos del Municipio de Almoloya de Juárez 2016*. Protección Civil de Almoloya de Juárez, H. Ayuntamiento de Almoloya de Juárez. Almoloya de Juárez : s.n., 2016. págs. 12, 17, 43. Número de expediente:PMAJ/DAM/ICTP/PC04/PPR-SEDATU/2016.
7. *Las galerías filtrantes del Alto Lerma: usos y manejos sociales.* **Montes Hernandez R., Romero Contreras A.T., Solís Morelos C., Rivera Herrejón M.G. y Zamorano Camiro S.** [ed.] El Colegio Mexiquense A.C. 36, Toluca, Edo. Méx : El Colegio Mexiquense A.C, 04 de Mayo-Septiembre de 2011, Economía, sociedad y territorio, Vol. XI, págs. 455-485. ISSN 2448-6183.
8. **Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMA).** Secretaría del Medio Ambiente. *Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Estado de México*. [En línea] Gobierno del Estado de México, Enero de 2018. [Citado el: 14 de Enero de 2018.] [http://sma.edomex.gob.mx/distribucion\\_de\\_cuencas](http://sma.edomex.gob.mx/distribucion_de_cuencas) .
9. **Secretaría de Gobernación (SEGOB).** ACUERDO por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*. [En línea] SEGOB, 27 de Mayo de 2016. [Citado el: 19 de Enero de 2018.] [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5439123&fecha=27/05/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5439123&fecha=27/05/2016).
10. **Gobierno del Estado de México.** *Atlas de la cuenca del Río Lerma en el Estado de México, Copendio*. Primera. Toluca : Consejo Editorial de la Administración Pública Estatal, 2011. págs. 83,86,101,102. Vol. I. ISBN 968-484-655-X (Colección Mayor).
11. **Andres Martinez.** Para todo México. [En línea] 15 de Enero de 2018. [Citado el: 16 de Enero de 2018.] <http://www.paratodomexico.com/estados-de-mexico/estado-mexico/hidrologia-mexico.html>.
12. **Secretaría de Fobernación (SEGOB).** ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas. *Diario*

*Oficial de la Federación*. [En línea] SEGOB, 27 de Enero de 2011. [Citado el: 20 de Enero de 2018.] [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5175730&fecha=26/01/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5175730&fecha=26/01/2011).

13. **Secretaría de Gobernación (SEGOB)**. ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas. *SEGOB*. [En línea] 30 de Mayo de 2017. [Citado el: 21 de Enero de 2018.] [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5484625&fecha=30/05/2017&print=true](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5484625&fecha=30/05/2017&print=true).

14. **Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)**. Red Hidrográfica 1:50000. [En línea] 2010. [Citado el: 20 de Enero de 2018.] [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones\\_hidrograficas.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrograficas.aspx).

15. **Gobierno del Estado de México**. *Atlas urbano de la cuenca hidrográfica del río Lerma*. [ed.] Comité editorial del Gobierno del Estado de México. Toluca : Comité editorial del Gobierno del Estado de México, 2002. págs. 13-28. Vol. VII. 212/1/018/2.

16. **Secretaría de Gobernación (SEGOB)**. ACUERDO por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada Río Lerma-Chapala. *Diario Oficial de la Federación*. [En línea] SEGOB, 15 de Octubre de 2003. [Citado el: 15 de Enero de 2018.] [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=688874&fecha=15/10/2003](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688874&fecha=15/10/2003).

17. **Valdés, Rosa Estela Hernández**. *Propuesta Teórico – Metodológica para la integración de la variable Alométrica en la caracterización y diagnóstico ambiental de las subcuencas La Gavia, San Diego y Almoloya*. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca : s.n., 2012. pág. 32, Tesis de maestría.

18. **H. Ayuntamiento de Almoloya de Juárez**. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Almoloya de Juárez, México*. Almoya de Juárez : s.n., 2009. págs. 2, 9. Clave geoestadística 15005.

19. **H. Ayuntamiento de Almoya de Juárez**. *Plan de desarrollo municipal 2016 – 2018*. Almoya de Juárez : s.n., 2016. pág. 43, Plan de desarrollo.

20. **Consejo Nacional de Población**. *Índices de marginación*. CONAPO. México : Primera, 2006. pág. 324. ISBN 970-628-847-3.

21. **Secretaría de Desarrollo Social, (SEDESOL)**. Catálogo de Localidades. *SEDESOL*. [En línea] Octubre de 2015. [Citado el: 23 de Enero de 2018.] <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=150050003>.

22. **NEMS, (National Environmental Monitoring Standards)**. *Open Channel Flow Measurement*. New Zwaland : NEMS, 2013. págs. 8-20, Environmental.

23. **IMTA y CONAGUA**. Manual de Aforos. [aut. libro] IMTA CONAGUA. *Métodos de aforos para ríos y canales*. s.l. : Subcoordinación editorial, IMTA, 1992, págs. 3-9.

24. **Nickisch, Mario Basán**. *Aforadores de corrientes de Agua*. INTA-EEA. Santiago del Estero : s.n., 2008. págs. 8-12, Apuntes de curso.

25. **Monroy, Manuel Agustín Lux**. Medidores de flujos en canales abiertos. *Método volumétrico de medición de caudal*. Guatemala : Universidad San Carlos de Guatemala, 2010.



26. **González, Edmundo Pedroza.** *Serie autodidáctica de medición.* CDMX : Comisión Nacional del Agua, IMTA, 2001.
27. **Joseph P. Capesius, Joseph R. Sullivan, Gregory B. O'Neill and Cory A. Williams.** *Using the Tracer-Dilution Discharge Method to Develop Streamflow Records for Ice-Affected Streams in Colorado.* Department of the Interior, U.S Geological Survey. Virginia : U.S. Geological Survey, 2005. págs. 14-18.
28. **CONAGUA(a), Comisión Nacional del Agua.** *Atlas del Agua en México 2016.* Ciudad de México : SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016.
29. **Viessman, Warren y Lewis, Gary.** *Introduction to Hydrology.* 5°. USA : Pearson, 2002. ISBN: 978-0673993373.
30. **CONAGUA(b), Comisión Nacional del Agua.** NOM-011-CONAGUA-2015. *Diario Oficial de la Federación.* 27 de 03 de 2015, pág. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015).
31. **García, Luis Bañón Blázquez y Jose F. Beviá.** Nociones de hidrología, El agua y la carretera. *Manual de carreteras.* Madrid : s.n., S/E, Febrero, págs. 4-5.
32. *Propuesta de modificación del método racional.* **López, R.** 342, 2001, CIMBRA: Revista de Colegio de Ingenieros Técnico de Obras Públicas, págs. 24-28. ISSN 0210-0479.
33. **SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.** *Hidrología Aplicada a las pequeñas obras hidráulicas.* CDMX : s.n., 2012.
34. *Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas.* **López, J.J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. y Gimena, F.** Navarra : s.n., Junio de 2012, Obras y proyectos, Vol. 12, págs. 15-30.
35. *Sistema de Información Geográfica.* **INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.** Guadalajara : INEGI, 2014. pág. 60.
36. **ESRI a, Environmental Systems Research Institute.** ArcGIS Resources: SIG se basa en capas. [En línea] 23 de 01 de 2018. <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000006000000.htm>.
37. **ESRI b, Environmental Systems Research Institute.** Desktop ArcGIS. [En línea] 23 de 01 de 2018. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/supplement/data-types-for-geoprocessing-tool-parameters.htm>.
38. **ESRI c, Environmental Systems Research Institute.** ArcGIS Resources. [En línea] 23 de 01 de 2018. <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>.
39. **Johnston, Kevin, y otros.** *ArcGIS 9. Using ArcGIS™ Geostatistical Analyst.* Redlands : ESRI, 2003.
40. *Modelización matemática en lecho fijo del flujo de ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable.* **Cea, Luis y Blandé, Ernest.** Madrid : CEDEX-Ministerio de Fomento, 2008. Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial. pág. 30.

41. **Durán, Adrián Lozano.** *Notas sobre Dinámica de Fluidos Computacional.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2014. pág. 95.
42. **CEIWR-HEC.** Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS software. [En línea] 23 de 01 de 2018. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.
43. —. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual, version 5.0.* Davis : Hidrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, 2016. pág. 960.
44. **ANSYS Inc.** ANSYS Fluent. [En línea] 23 de 01 de 2018. <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
45. *Introduction to ANSYS-FLUENT: Introduction to CFD Methodology. Customer Training Material.* **ANSYS Inc.** Canonsburg, PA : ANSYS Inc., 2010. Introduction to ANSYS-FLUENT. pág. 17.
46. **López Rebollar, Boris Miguel.** *Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en cuacultura.* Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. Toluca : Universidad Autónoma del Estado de México, 2015. Tesis de Maestría.
47. **Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos.** Decreto por el que se expide la Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación.* 24 de Diciembre de 2015, Vol. DCCXLVII, 20.
48. **Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos.** Decreto por el que se expide la Ley de la Industria Eléctrica. *Diario Oficial de la Federación, órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos.* 11 de Agosto de 2014, Vol. DCCXXXI, 8.
49. *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031 (PRODESEN).* CDMX : Secretaría de energía (SENER), 2017.
50. **Secretaría de energía (SENER).** *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031.* Planeación e Información energetica, SENER. CDMX : Planeación e Información energetica, 2017.
51. **Ente nazionale per l'energia elettrica (ENEL).** endesaeduca. [En línea] Grupo ENEL, Diciembre de 2014. [https://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas#menu](https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas#menu).
52. **Instituto de Investigaciones Electricas (IEL).** Energía Mini hidráulica. *Boletín Breves.* Cuernavaca, Mor. : s.n., 2013.
53. **(UCA), Universidad Centroamericana** "José Simeón Cañas". *Centrales hidroeléctricas. Apuntes de curso de hidrololoía, Ingeniería Civil.* [Documento, PDF, digitalización] El Salvador : s.n., 2017.
54. **Poder Ejecutivo Federal. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.** [En línea] 19 de 01 de 2018. [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148\\_190118.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_190118.pdf).
55. **FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.** *Evaluación del Impacto Ambiental.* Roma, Italia : FAO, 2012. ISBN 978-92-5-307276-7.

- 56. SEMARNAT(a), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** *Guía para la presentación de las manifestación de impacto ambiental del sector eléctrico, modalidad: Particular.* Ciudad de México : SEMARNAT, 2002. pág. 115. ISBN 968-817-529-3.
- 57. SEMARNAT(b),** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental del sector hidráulico, modalidad: Particular.* Ciudad de México : SEMARNAT, 2003. pág. 53.
- 58. Sustentabilidad y racionalidad ambiental: hacia 'otro' programa de sociología ambiental.** Leff, Enrique Leff. [ed.] Joel Romero Catañeda. 6, México : s.n., 2013, Politai, Vol. 4, págs. 127-154. 2219-4142.
- 59. SEDESOL, Secretaría de Desarrollo Social. Catálogo de localidades. SEDESOL.** [En línea] Octubre de 2015. [Citado el: 23 de 01 de 2018.] [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5484625&fecha=30/05/2017&print=true](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5484625&fecha=30/05/2017&print=true).
- 60. CONAPO,** Consejo Nacional de Población. *Índices de marginación.* México : CONAPO, 2006. pág. 324. ISBN 970-628-847-3.
- 61. NEMS.** *Open Chanel Flow Measurement.* New Zwaland : National Enviromental Monitoring Standards, 2013. págs. 8-20, Environmental.
- 62. INEGI,** Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. [En línea] INEGI, 2018. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>.
- 63. Farjas, M.** Levantamientos batimétricos. Madrid : s.n., S/E.
- 64. CONAGUA,** Comisión Nacional del Agua. *Atlas del Agua en México 2016.* Ciudad de México : SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016.
- 65. INEGI.** *Catedra INEGI.* s.l. : Universida de Guanajuato, 2017. pág. 14.
- 66. SAGARPA,** Secretaria de agricultua, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. Hidrología aplicada a pequeñas obras hidraulicas. CDMX : s.n., S/E.
- 67. México, Universidad Autonoma de. Observatorio Hidrológico, UNAM.** [En línea] UNAM, 2018. <https://www.oh-iiunam.mx/>.
- 68. Becerril y Álvarez, Angelica Álvarez Mejía y Juan Manuel.** *Simulación numérica bidimensional del flujo en cauces naturales altamente erosivos, caso de estudio "Rio Agua Bendita, Metepec Edo. México".* Universidad Autonma del Estado de México. Toluca : s.n., 2017. Tesis de licenciatura.
- 69. Salinas Tapia, Vilchis Francés, Magaña Hernandández, Zepeda Mondragón, Kalidou Mamadpu, Día Delgado.** Toluca : s.n., 2014. Desarrollo de herramientas computacionales utilizando computo técnico, para su uso en hidrología, hidráulica fluvial y gestión de los recursos hidricos.
- 70. Aranda, Daniel Campos.** *Introducción a la hidrología Urbana.* San Luis Potosi : Printego, 2010. págs. 123-174. ISBN-970-95118-1-5.

- 71. C., Baeza-Ramirez.** *Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia. (Tesis de Maestría).* México : UNAM, 2007.
- 72. INEGI.** *Taller, Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL).* Guanajuato : s.n., 2013.
- 73. (USDA), Department of Agriculture.** *Urban Hydrology for small watersheds.* Washington : s.n., 1986.
- 74. Sotelo Ávila, Gilberto.** *Hidráulica de Canales.* 1ra. Ciudad de México : Facultad de Ingeniería - UNAM, 2002. pág. 836. ISBN: 968-3694330.
- 75. Cimbala, Yunus A. Cengel & John M.** *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones.* s.l. : McGrawHill, 2012. 978-607-15-0779-2.
- 76. Rodríguez, Sergio A. Salinas.** *Guía rápida para determinación de caudales ecológicos.* Fondo mundial para la naturaleza y fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P : s.n., 2011.
- 77. Sánchez, Santiago Humberto Garzón.** *MODELACIÓN EN CFD DE UN TRAMO DEL RÍO ARZOBISPO (BOGOTÁ D.C) .* Bogotá : PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA , 2014.
- 78. ANSYS, Inc.** *Fluid Dynamics Manual, ANSYS R15.* 2014.
- 79. Sánchez, Claudia.** *Turbinas hidrocinéticas una alternativa para generacion eléctrica.* 5, 2 de Diciembre de 2016, Vol. 2, págs. 2-4.
- 80. Power, Smart Hydro.** [En línea] 2018. <https://www.smart-hydro.de/renewable-energy-systems/hydrokinetic-turbines-river-canal/>.
- 81. Indénergie. River Turbine.** [En línea] Indénergie, 2018. <http://idenergie.ca/es/home/>.
- 82. Enviromental Systems Research Institute (ESRI). Desktop ArcGIS. ESRI.** [En línea] 2018. [Citado el: Enero de 17 de 2018.] <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/supplement/data-types-for-geoprocessing-tool-parameters.htm>.
- 83. Enviromental Systems Research Institute ArcGIS (ESRI).** ArcGIS, resourses. *ArcGis Web Site.* [En línea] 2018. [Citado el: 17 de Enero de 2018.] <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>.
- 84. ArcGIS geoestatical Analyst.** Johnston, K., y otros. Redlans, USA : s.n., 2001.
- 85. US Army Corps of Engineers.** *Hec-Ras River Analisis System User´s Manual.* [En línea] 2016. [Citado el: 20 de Enero de 2018.]
- 86. Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos de America (USACE).** *Hydrologic Engineering Center´s River Analysis System.* [En línea] 2018. [Citado el: 22 de Enero de 2018.] <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras>.
- 87. Ansys Inc. Ansys fluent, products.** [En línea] Ansys Inc., 2018. [Citado el: 22 de Enero de 2018.] <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
- 88. ANSYS Inc. Introduction to ANSYS FLUENT:** *Introduction to CFD Methodology. Customer Training Material; Introduccion to ANSYS FLUENT.* México : Curso de capacitación para usuarios de ANSYS-Fluent, impartido por Cavendish. SA deCV, 2010.

- 89. Modelación matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable.** E., Cea L. y Bladé. [ed.] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Ministerio de fomento (CEDEX). Madrid : s.n., 2008.
- 90. Sanchez, San Roman Javier.** Calculo de la precipitación Neta mediante el método del S.C.S. *Hidrología superficial y subterránea*. Salamanca : Dpto de Geología de la universidad Salamanca, 2017, 1, págs. 1-12.
- 91. ANSYS. ANSYS FLUENT. Volume of Fluid (VOF) Model Theory.** [En línea] 2018. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node880.htm>. Fluent Inc. 2006-09-20.

# Anexos

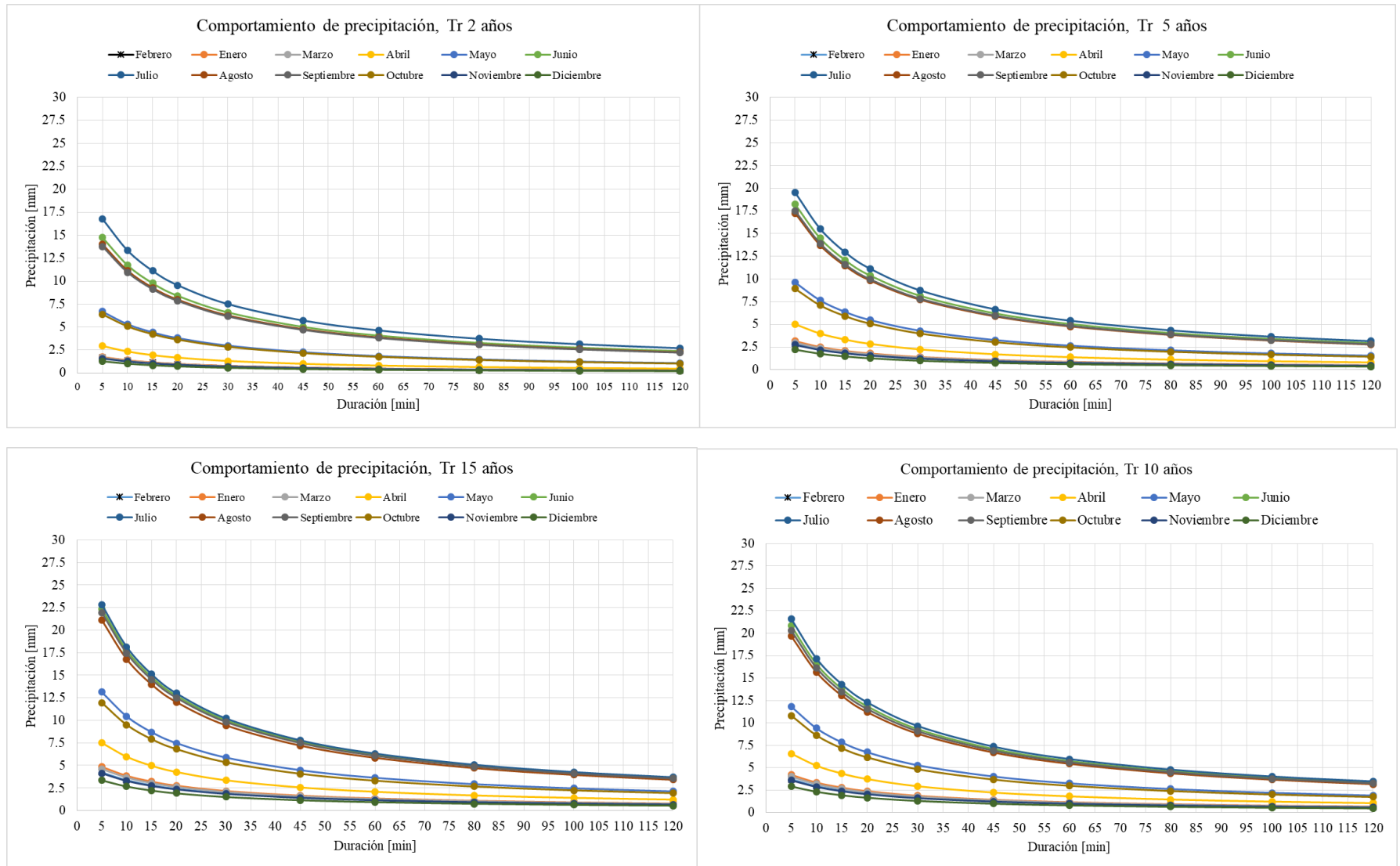
## Anexo 1: Centrales hidroeléctricas en México

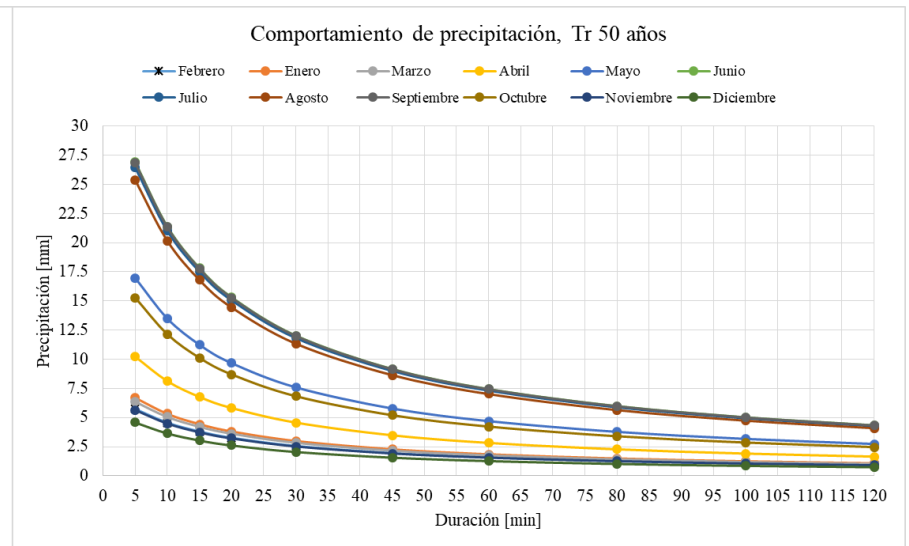
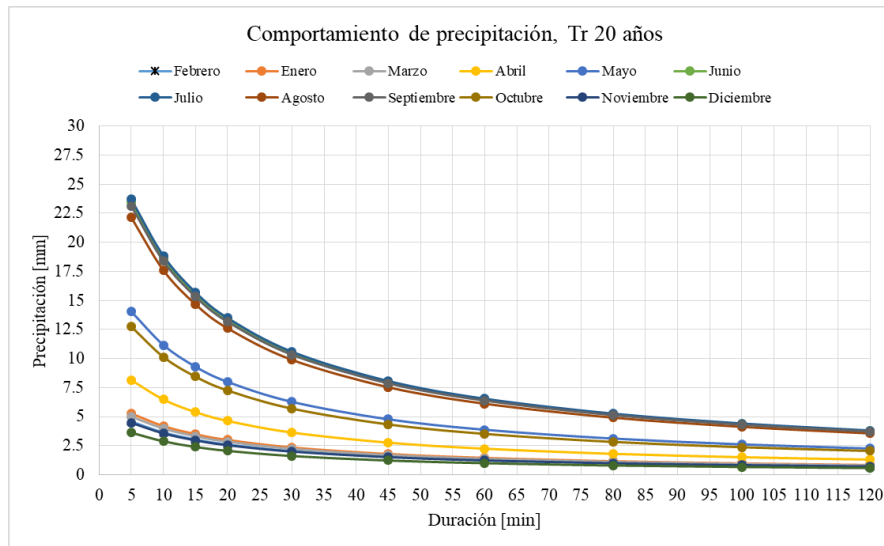
No.	Nombre	Entidad Federativa	Esquema	Capacidad Total [MW]	Generación Bruta [GWh]
<b>Grandes centrales</b>					
1	Chicoasén (Manuel Moreno Torres)	CHIS	GEN-CFE	2 400	4 513
2	Infiernillo	GRO	GEN-CFE	1 200	2 813
3	Malpaso	CHIS	GEN-CFE	1 080	2 477
4	Aguamilpa Solidaridad	NAY	GEN-CFE	960	1 998
5	Angostura (Belisario Domínguez)	CHIS	GEN-CFE	900	2 030
6	El Cajón (Leonardo Rodríguez Al.)	NAY	GEN-CFE	750	1 149
7	La Yesca (Alfredo Elías Ayub)	NAY	GEN-CFE	750	1 059
8	Caracol (Carlos Ramírez Ulloa)	GRO	GEN-CFE	600	1 262
9	Huites (Luis Donaldo Colosio)	SIN	GEN-CFE	422	1 062
10	Peñitas (Ángel Albino Corzo)	CHIS	GEN-CFE	420	1 309
11	Temascal y Ampliación Temascal	OAX	GEN-CFE	354	1 214
12	Villita (José María Morelos)	MICH	GEN-CFE	320	1 278
13	Zimapán (Fernando Hiriart Balderrama)	HGO	GEN-CFE	292	1 848
14	Agua Prieta (Valentín Gómez Farías)	JAL	GEN-CFE	240	241
15	Mazatepec	PUE	GEN-CFE	220	593
16	El Novillo (Plutarco Elías Calles)	SON	GEN-CFE	135	531
17	Generadora Fénix, Necaxa	PUE	GEN	109	395
18	Comedero (Raúl J. Marsal)	SIN	GEN-CFE	100	342
19	Bacurato	SIN	GEN-CFE	92	266
20	Humaya	SIN	GEN-CFE	90	267
21	Cupatitzio	MICH	GEN-CFE	80	467
22	Santa Rosa (General Manuel M. Diéguez)	JAL	GEN-CFE	70	277
23	La Amistad	COAH	GEN-CFE	66	49
24	Cóbano	MICH	GEN-CFE	60	269
25	El Fuerte (27 de Septiembre)	SIN	GEN-CFE	59	366
26	Generadora Fénix, Lerma (Tepuxtepec)	MICH	GEN	57	229
27	Colimilla	JAL	GEN-CFE	51	88
28	Generadora Fénix, Patla	PUE	GEN	45	139
29	Generadora Fénix, Tepexic	PUE	GEN	45	99
30	Tingambato	MEX	GEN-CFE	42	85
31	Compañía de Energía Mexicana	PUE	AUT	36	235
32	Tuxpango	VER	GEN-CFE	36	131
33	Electricidad del Golfo	VER	AUT	35	106
34	Falcón	TAMS	GEN-CFE	32	57
<b>Total</b>			34	12 148	29 244
<b>Pequeñas centrales</b>					
1	La Venta (Ambrosio Figueroa)	GRO	GEN-CFE	30	86
2	Mexicana de Hidroelectricidad Mexhidro	GRO	AUT	30	136
3	Generadora Eléctrica San Rafael	NAY	AUT	29	96
4	Chilapan	VER	GEN-CFE	26	112
5	Boquilla	CHIH	GEN-CFE	25	82
6	Santa Bárbara	MEX	GEN-CFE	23	33
7	El Retiro ( José Cecilio del Valle )	CHIS	GEN-CFE	21	80
8	Primero Empresa Minera	DGO	AUT	20	58
9	Proveedora de Electricidad de Occidente	JAL	AUT	19	50
10	Oviachic	SON	GEN-CFE	19	119
11	Botello	MICH	GEN-CFE	18	67
12	El Salto (Camilo Arriaga)	SLP	GEN-CFE	18	87
13	Minas	VER	GEN-CFE	15	85
14	Sanalona (Salvador Alvarado)	SIN	GEN-CFE	14	71
15	Platanal	MICH	GEN-CFE	13	41
16	Procesamiento Energético Mexicano	VER	AUT	11	51
<b>Total</b>			16	331	1254



Pequeñas centrales					
1	La Venta (Ambrosio Figueroa)	GRO	GEN-CFE	30	86
2	Mexicana de Hidroelectricidad Mexhidro	GRO	AUT	30	136
3	Generadora Eléctrica San Rafael	NAY	AUT	29	96
4	Chilapan	VER	GEN-CFE	26	112
5	Boquilla	CHIH	GEN-CFE	25	82
6	Santa Bárbara	MEX	GEN-CFE	23	33
7	El Retiro ( José Cecilio del Valle )	CHIS	GEN-CFE	21	80
8	Primero Empresa Minera	DGO	AUT	20	58
9	Proveedora de Electricidad de Occidente	JAL	AUT	19	50
10	Oviachic	SON	GEN-CFE	19	119
11	Botello	MICH	GEN-CFE	18	67
12	El Salto (Camilo Arriaga)	SLP	GEN-CFE	18	87
13	Minas	VER	GEN-CFE	15	85
14	Sanalona (Salvador Alvarado)	SIN	GEN-CFE	14	71
15	Platanal	MICH	GEN-CFE	13	41
16	Procesamiento Energético Mexicano	VER	AUT	11	51
<b>Total</b>			16	331	1254
Mini centrales					
1	Mocúzari	SON	GEN-CFE	10	49
2	Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma, Planta Orizaba	VER	AUT	10	14
3	Encanto	VER	GEN-CFE	10	17
4	Hidroelectricidad del Pacífico	JAL	AUT	9	28
5	Puente Grande	JAL	GEN-CFE	9	34
6	Colotipa	GRO	GEN-CFE	8	33
7	Hidroeléctrica Arco Iris	JAL	AUT	8	47
8	Hidroeléctrica Trigomil	JAL	P.P.	8	8
9	Zumpinito	MICH	GEN-CFE	8	51
10	Generadora Fénix, Alameda	MEX	GEN	7	5
11	Bombaná	CHIS	GEN-CFE	5	23
12	Intermedia (Luis M. Rojas)	JAL	GEN-CFE	5	14
13	Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo	MICH	AUT	4	15
14	Hidrorizaba II	VER	AUT	4	19
15	Colina	CHIH	GEN-CFE	3	9
16	San Pedro Porúas	MICH	GEN-CFE	3	5
17	Schpoiná	CHIS	GEN-CFE	2	8
18	Compañía Eléctrica Carolina	GTO	AUT	2	5
19	Jumatán	NAY	GEN-CFE	2	13
20	Tamazulapan	OAX	GEN-CFE	2	6
21	Portezuelo I	PUE	GEN-CFE	2	9
22	Portezuelo II	PUE	GEN-CFE	2	4
23	Hidrorizaba	VER	AUT	2	9
24	Zagis	VER	AUT	2	11
25	Ixtaczoquitlán	VER	GEN-CFE	2	13
26	Texolo	VER	GEN-CFE	2	12
<b>Total</b>			26	131	461

## Anexo 2: Curvas de intensidad duración y frecuencia (IDF)





### *Anexo 3: Aforos en sitio*

**Octubre 2017**



Puente los Velázquez



Puente Benito Juárez

**Junio 2018**



Puente los Velázquez



Puente Benito Juárez

**Julio 2018**



Puente los Velázquez



Puente Benito Juárez



**Agosto 2018**



Puente los Velazquez



Puente Benito Juarez

**Septiembre 2018**

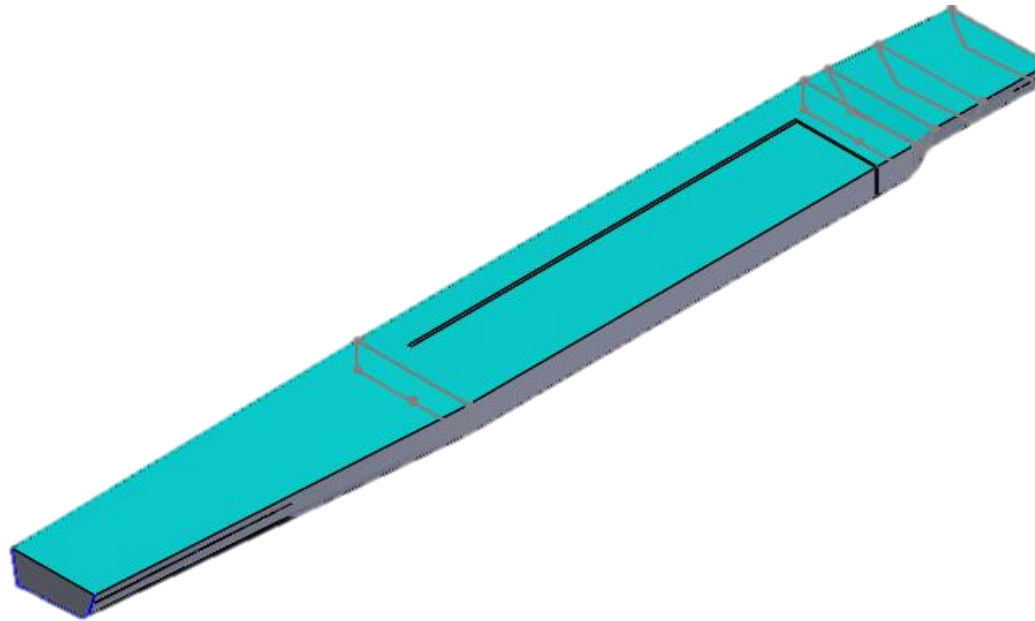


Puente los Velázquez



Puente Benito Juárez

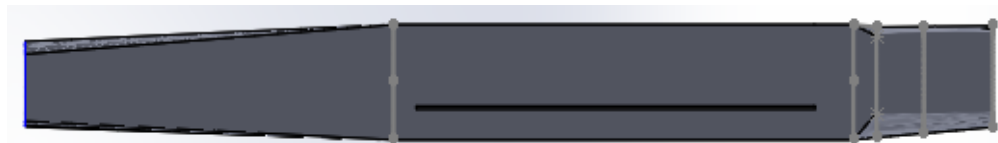
*Anexo 4: Geometría de volumen de volumen de control de flujo*



Vista isométrica del volumen de control



Vista lateral



Vista en planta

### Anexo 5: Resultados numéricos de la aplicación del método racional y Hec-HMS

Racional, Sección A							Racional, Sección B						
	Tr2	Tr5	Tr10	Tr15	Tr20	Tr 50		Tr2	Tr5	Tr10	Tr15	Tr20	Tr 50
Enero	0.32	0.57	0.77	0.88	0.96	1.22	Enero	0.31	0.56	0.75	0.86	0.94	1.19
Febrero	0.25	0.42	0.55	0.63	0.68	0.85	Febrero	0.30	0.51	0.66	0.75	0.82	1.02
Marzo	0.25	0.44	0.59	0.68	0.74	0.94	Marzo	0.30	0.53	0.71	0.82	0.89	1.13
Abril	0.44	0.74	0.98	1.11	1.21	1.52	Abril	0.53	0.89	1.17	1.34	1.45	1.82
Mayo	0.99	1.43	1.75	1.95	2.08	2.52	Mayo	1.19	1.71	2.11	2.34	2.50	3.03
Junio	2.19	2.70	3.09	3.32	3.48	3.99	Junio	2.63	3.25	3.71	3.99	4.18	4.80
Julio	2.49	2.90	3.21	3.39	3.51	3.92	Julio	2.99	3.48	3.85	4.07	4.22	4.71
Agosto	2.08	2.56	2.92	3.13	3.28	3.76	Agosto	2.50	3.07	3.51	3.76	3.94	4.52
Septiembre	2.04	2.60	3.01	3.26	3.43	3.98	Septiembre	2.46	3.12	3.62	3.91	4.12	4.78
Octubre	0.95	1.32	1.61	1.77	1.89	2.27	Octubre	1.14	1.59	1.93	2.13	2.27	2.72
Noviembre	0.23	0.41	0.54	0.61	0.67	0.84	Noviembre	0.28	0.49	0.64	0.73	0.80	1.01
Diciembre	0.19	0.33	0.43	0.50	0.54	0.68	Diciembre	0.23	0.40	0.52	0.60	0.65	0.81

Método Hec-HMS, Basado en SCS, Punto A							Método Hec-HMS, Basado en SCS, Punto B						
	Tr2	Tr5	TR 10	Tr15	TR20	TR50		Tr2	Tr5	TR 10	Tr15	TR20	TR50
Enero	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	1	Enero	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1.2
Febrero	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	Febrero	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	1
Marzo	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	1	Marzo	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.1
Abril	0.3	0.7	1	1.3	1.4	2.1	Abril	0.4	0.8	1.2	1.5	1.7	2.5
Mayo	1	1.9	2.6	3.1	3.4	4.6	Mayo	1.2	2.2	3.1	3.7	4.2	5.6
Junio	3.7	5.2	6.4	7.1	7.6	9.4	Junio	4.5	6.3	7.7	8.6	9.3	11.4
Julio	4.5	5.8	6.7	7.3	7.7	9.1	Julio	5.5	7	8.2	8.9	9.4	11.1
Agosto	3.4	4.7	5.8	6.5	7	8.6	Agosto	4.1	5.8	7.1	7.9	8.5	10.4
Septiembre	3.3	4.9	6.2	6.9	7.5	9.3	Septiembre	4	5.9	7.4	8.4	9.1	11.4
Octubre	1	1.7	2.3	2.7	2.9	3.9	Octubre	1.2	2	2.7	3.2	3.6	4.8
Noviembre	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	Noviembre	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9
Diciembre	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	Diciembre	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7



## Anexo 6: Cálculo de caudales aforados

OCTUBRE (2017)								
Benito Juárez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0.5	2.43	2.25	0.18	0.0944	0.1700	0.0160	0.907
2	1	2.5	2.25	0.25	0.1225	0.2733	0.0335	
3	1.5	2.53	2.25	0.28	0.1438	0.3833	0.0551	
4	2	2.62	2.25	0.37	0.1794	0.5825	0.1045	
5	2.5	2.63	2.25	0.38	0.195	0.8160	0.1591	
6	3	2.72	2.25	0.47	0.288	0.7920	0.2281	
7	3.5	2.705	2.25	0.46	0.23	0.6375	0.1466	
8	4	2.7	2.25	0.45	0.2194	0.5100	0.1119	
9	4.5	2.6	2.25	0.35	0.1725	0.2550	0.0440	
10	5	2.46	2.25	0.21	0.1138	0.0700	0.0080	
Ma. De los Angeles								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0.5			0.46	0.2313	0.3620	0.0837	0.908
2	1			0.48	0.2388	0.5660	0.1352	
3	1.5			0.48	0.2369	0.5720	0.1355	
4	2			0.43	0.2138	0.5180	0.1107	
5	2.5			0.36	0.1844	0.5250	0.0968	
6	3			0.36	0.1806	0.4700	0.0849	
7	3.5			0.37	0.1869	0.4800	0.0897	
8	4			0.41	0.2019	0.5140	0.1038	
9	4.5			0.4	0.2006	0.3375	0.0677	
Febrero								
Puente Los Velasquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0.3311			0.1335	0.0611	0.4400	0.0269	0.251
2	0.509			0.2117	0.0938	0.4200	0.0394	
3	0.442			0.1771	0.0804	0.3950	0.0318	
4	0.467			0.1427	0.0719	0.3450	0.0248	
5	0.512			0.1432	0.0793	0.1500	0.0119	
6	0.492			0.264	0.1275	0.3800	0.0485	
7	0.518			0.289	0.1511	0.3833	0.0579	
8	0.621			0.1359	0.0668	0.1500	0.0100	
Benito Juarez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0.156			0.1241	0.0352	0.0000	0.0000	0.28
2	0.4411			0.0909	0.0474	0.0000	0.0000	
3	0.5116			0.1263	0.0615	0.2033	0.0125	
4	0.4429			0.1895	0.0902	0.3500	0.0316	
5	0.5506			0.1827	0.0915	0.5000	0.0458	
6	0.4652			0.152	0.0757	0.4900	0.0371	
7	0.5092			0.15	0.0733	0.5400	0.0396	
8	0.4688			0.1465	0.0734	0.5833	0.0428	
9	0.5054			0.1761	0.0816	0.4667	0.0381	
10	0.4683			0.1371	0.0686	0.4200	0.0288	
11	0.568			0.07	0.0289	0.0000	0.0000	

Mayo								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0.5	1.735	1.565	0.17	0.0425	0.1980	0.0084	0.313
2	1	1.955	1.58	0.375	0.13	0.2100	0.0273	
3	1.5	1.91	1.57	0.34	0.1775	0.3680	0.0653	
4	2	1.915	1.575	0.34	0.17	0.3160	0.0537	
5	2.5	1.925	1.575	0.35	0.1725	0.3340	0.0576	
6	3	1.905	1.58	0.325	0.168	0.2700	0.0454	
7	3.5	1.867	1.57	0.297	0.155	0.1680	0.0260	
8	4	1.867	1.575	0.292	0.1485	0.2000	0.0297	
Puente los Benito Juarez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0	1.655	1.5	0.155	0.0388	0.1150	0.0045	0.339
2	0.5	1.627	1.51	0.117	0.068	0.1000	0.0068	
3	1	1.765	1.5	0.265	0.0955	0.0930	0.0089	
4	1.5	1.835	1.52	0.315	0.145	0.2200	0.0319	
5	2	1.841	1.52	0.321	0.159	0.3400	0.0541	
6	2.5	1.935	1.52	0.415	0.184	0.4100	0.0754	
7	3	1.91	1.515	0.395	0.2025	0.4610	0.0934	
8	3.5	1.878	1.52	0.358	0.1883	0.3420	0.0644	
9	4	1.753	1.517	0.236	0.1485	0.3230	0.0480	
10	4.5	1.722	1.515	0.207	0.1107	0.2900	0.0321	
11	5	1.664	1.52	0.144	0.0877	0.2367	0.0208	
12	5.5	1.632	1.52	0.112	0.064	0.2350	0.0150	
13	6.5	1.6	1.52	0.08	0.048	0.0750	0.0036	

Junio								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	1	2.53	2.18	0.35	0.175	0.19	0.0333	1.982
2	2	2.61	2.17	0.44	0.395	0.14	0.0553	
3	3	2.62	2.17	0.45	0.445	0.56	0.2492	
4	4	2.54	2.16	0.38	0.415	0.13	0.0540	
5	5	2.39	2.19	0.2	0.29	0.47	0.1363	
6	6	2.58	2.19	0.39	0.295	0.645	0.1903	
7	7	2.62	2.2	0.42	0.405	0.25	0.1013	
8	8	2.63	2.2	0.43	0.425	0.4	0.1700	
9	9	2.73	2.2	0.53	0.48	0.4	0.1920	
10	10	2.6	2.185	0.415	0.4725	0.475	0.2244	
11	11	2.68	2.19	0.49	0.4525	0.42	0.1901	
12	12	2.77	2.2	0.57	0.53	0.21	0.1113	
13	13	2.89	2.2	0.69	0.6275	0.18	0.1130	
14	14	2.75	2.2	0.55	0.61	0.2	0.1220	
15	15	2.68	2.2	0.48	0.505	0.067	0.0338	
16	16	2.68	2.2	0.48	0.6	0.01	0.0060	
Puente los Benito Juarez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0	183.4	166	17.4	0.4213	0.5230	0.2203	2.611
2	0.5	188.2	165	23.2	0.8362	0.5130	0.4290	
3	1	190.7	165	25.7	0.8287	0.6130	0.5080	
4	1.5	188.5	165	23.5	0.788	0.6080	0.4791	
5	2	190.4	164	26.4	0.6075	0.5900	0.3584	
6	2.5	185.1	165	20.1	0.8925	0.6900	0.6158	
Julio								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0	19.1	18.45	0.65	0.0162	0.0400	0.0006	0.293
2	0.5	21.73	18.6	3.13	0.0945	0.2620	0.0248	
3	1	21.13	18.7	2.43	0.139	0.5280	0.0734	
4	1.5	20.71	18.7	2.01	0.11	0.4470	0.0492	
5	2	20.06	18.7	1.36	0.0843	0.4750	0.0400	
6	2.5	20.1	18.65	1.45	0.0703	0.4200	0.0295	
7	3	20.22	18.7	1.52	0.0703	0.5650	0.0397	
8	3.5	20.99	18.7	2.29	0.0953	0.2650	0.0253	
9	4	19.94	18.7	1.24	0.0883	0.1150	0.0102	
Puente los Benito Juarez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Qtotal [m <sup>3</sup> /s]
1	0	183.4	166	17.4	0.0435	0.5230	0.0228	0.483
2	0.5	188.2	165	23.2	0.1015	0.5130	0.0521	
3	1	190.7	165	25.7	0.1223	0.6130	0.0750	
4	1.5	188.5	165	23.5	0.123	0.6080	0.0748	
5	2	190.4	164	26.4	0.1247	0.5900	0.0736	
6	2.5	185.1	165	20.1	0.1163	0.6900	0.0802	
7	3	181.5	164	17.5	0.094	0.5100	0.0479	
8	3.5	181.4	165	16.4	0.0887	0.4730	0.0420	
9	4	183	165	18	0.045	0.3200	0.0144	

Agosto								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m²]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m³/s]	Qtotal [m³/s]
1	0	245	216.5	28.5	0.4375	0.045	0.0197	2.566
2	1	246.52	216.5	30.02	0.419	0.31	0.1299	
3	2	270.3	216.5	53.8	0.5305	0.373	0.1979	
4	3	268.8	216.5	52.3	0.557	0.43	0.2395	
5	4	275.6	216.5	59.1	0.5615	0.55	0.3088	
6	5	269.7	216.5	53.2	0.472	0.6225	0.2938	
7	6	257.7	216.5	41.2	0.316	0.643	0.2032	
8	7	238.5	216.5	22	0.2685	0.725	0.1947	
9	8	248.2	216.5	31.7	0.297	0.55	0.1634	
10	9	244.2	216.5	27.7	0.211	0.475	0.1002	
11	10	231	216.5	14.5	0.211	0.69	0.1456	
12	11	244.2	216.5	27.7	0.211	0.68	0.1435	
13	12	231	216.5	14.5	0.1425	0.63	0.0898	
14	13	230.5	216.5	14	0.161	0.58	0.0934	
15	14	234.7	216.5	18.2	0.1835	0.56	0.1028	
16	15	235	216.5	18.5	0.3115	0.45	0.1402	
Puente Benito Juarez								
3.18 m³/s								
Septiembre								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m²]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m³/s]	Qtotal [m³/s]
1	0	340.2	268.5	0.717	0.717	0.045	0.0323	3.983
2	1	346.2	268.5	0.777	1.494	0.31	0.4631	
3	2	346.2	268.5	0.777	1.55	0.373	0.5782	
4	3	346.4	268.5	0.779	1.556	0.43	0.6691	
5	4	332.5	268.8	0.637	1.416	0.55	0.7788	
6	5	307.8	268.8	0.39	1.027	0.6225	0.6393	
7	6	292.8	267.5	0.253	0.643	0.643	0.4134	
8	7	273.6	265	0.086	0.339	0.725	0.2458	
Puente Benito Juarez								
4.07 m³/s								
Octubre (2017)								
Puente los Velazquez								
Sección	Cota x [m]	Plantilla [m]	Espejo [m]	Tirante y [m]	Area [m²]	V <sub>prom</sub> [m/s]	Q <sub>Sec</sub> [m³/s]	Qtotal [m³/s]
1	0.06	1.745	1.695	0.05	0.0125	0.03	0.0004	1.183
2	0.12	1.83	1.675	0.155	0.1025	0.41	0.0420	
3	0.18	1.87	1.65	0.22	0.1875	0.645	0.1209	
4	0.24	2.02	1.625	0.395	0.3075	0.625	0.1922	
5	0.3	1.98	1.59	0.39	0.3975	0.802	0.3188	
6	0.36	1.894	1.589	0.305	0.4375	0.558	0.2441	
7	0.42	1.81	1.545	0.265	0.285	0.413	0.1177	
8	0.48	1.76	1.54	0.22	0.2425	0.573	0.1390	
9	0.54	1.596	1.515	0.081	0.15	0.05	0.0075	
Puente los Velazquez								
1.7312 m³/s								

## Anexo 7: Tirante y energía valores numéricos de la sección analizada

- Generación de energía y potencia a partir de caudales mínimos, medios y máximos.

Generación mínima					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.14	0.11	0.13	0.18	0.190
Febrero	0.12	0.09	0.11	0.15	0.136
Marzo	0.11	0.06	0.08	0.14	0.082
Abril	0.13	0.09	0.11	0.16	0.145
Mayo	0.13	0.09	0.12	0.16	0.140
Junio	0.15	0.13	0.15	0.19	0.240
Julio	0.19	0.24	0.25	0.24	0.557
Agosto	0.22	0.29	0.34	0.26	0.731
Septiembre	0.23	0.3	0.37	0.26	0.775
Octubre	0.19	0.24	0.25	0.24	0.557
Noviembre	0.18	0.21	0.22	0.23	0.466
Diciembre	0.16	0.17	0.18	0.21	0.342

Generación media					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.21	0.26	0.29	0.25	0.640
Febrero	0.18	0.21	0.22	0.23	0.466
Marzo	0.15	0.13	0.15	0.19	0.240
Abril	0.16	0.17	0.18	0.21	0.342
Mayo	0.2	0.25	0.27	0.24	0.597
Junio	0.4	0.68	1.05	0.42	2.808
Julio	0.61	1.34	2.22	0.63	8.255
Agosto	0.62	1.4	2.32	0.64	8.762
Septiembre	0.66	1.54	2.53	0.68	10.247
Octubre	0.46	0.85	1.38	0.48	3.993
Noviembre	0.24	0.31	0.38	0.27	0.832
Diciembre	0.18	0.22	0.23	0.23	0.489

Generación Maxima					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.57	1.2	1.99	0.59	6.922
Febrero	0.51	1	1.65	0.53	5.182
Marzo	0.54	1.1	1.82	0.56	6.023
Abril	0.88	2.5	3.85	0.90	22.089
Mayo	1.4	5.6	7.32	1.43	78.478
Junio	1.89	11.4	12.49	1.93	215.920
Julio	1.87	11.1	12.25	1.91	207.996
Agosto	1.83	10.4	11.69	1.87	190.648
Septiembre	1.89	11.4	12.49	1.93	215.920
Octubre	1.28	4.8	6.49	1.31	61.530
Noviembre	0.48	0.9	1.47	0.50	4.403
Diciembre	0.41	0.7	1.09	0.43	2.957

- Generación de energía y potencia a partir de los caudales del método Racional, Sección A

Tr = 2					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.24	0.32	0.40	0.27	0.855
Febrero	0.2	0.25	0.27	0.24	0.597
Marzo	0.2	0.25	0.27	0.24	0.597
Abril	0.3	0.44	0.61	0.33	1.408
Mayo	0.51	0.99	1.63	0.53	5.131
Junio	0.81	2.19	3.45	0.83	17.827
Julio	0.87	2.49	3.84	0.89	21.755
Agosto	0.79	2.08	3.30	0.81	16.518
Septiembre	0.78	2.04	3.25	0.80	15.997
Octubre	0.49	0.95	1.56	0.51	4.738
Noviembre	0.19	0.23	0.24	0.24	0.534
Diciembre	0.17	0.19	0.20	0.22	0.402

Tr = 5					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.36	0.57	0.84	0.38	2.142
Febrero	0.29	0.42	0.57	0.32	1.308
Marzo	0.3	0.44	0.61	0.33	1.408
Abril	0.42	0.74	1.16	0.44	3.197
Mayo	0.63	1.43	2.37	0.65	9.090
Junio	0.92	2.7	4.10	0.94	24.931
Julio	0.96	2.9	4.35	0.98	27.930
Agosto	0.89	2.56	3.92	0.91	22.876
Septiembre	0.9	2.6	3.97	0.92	23.492
Octubre	0.6	1.32	2.19	0.62	8.002
Noviembre	0.29	0.41	0.55	0.32	1.279
Diciembre	0.25	0.33	0.41	0.28	0.915

Tr = 10					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.43	0.77	1.22	0.45	3.398
Febrero	0.35	0.55	0.81	0.37	2.013
Marzo	0.37	0.59	0.88	0.39	2.272
Abril	0.5	0.98	1.61	0.52	4.984
Mayo	0.71	1.75	2.84	0.73	12.510
Junio	0.99	3.09	4.57	1.01	30.688
Julio	1.01	3.21	4.71	1.03	32.521
Agosto	0.96	2.92	4.37	0.98	28.126
Septiembre	0.98	3.01	4.48	1.00	29.590
Octubre	0.68	1.61	2.63	0.70	11.032
Noviembre	0.35	0.54	0.79	0.37	1.978
Diciembre	0.3	0.43	0.59	0.33	1.378

Tr = 20					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.50	0.96	1.58	0.52	4.882
Febrero	0.40	0.68	1.05	0.42	2.808
Marzo	0.42	0.74	1.16	0.44	3.197
Abril	0.57	1.21	2.01	0.59	6.979
Mayo	0.79	2.08	3.30	0.81	16.518
Junio	1.06	3.48	5.03	1.08	36.987
Julio	1.07	3.51	5.07	1.09	37.651
Agosto	1.03	3.28	4.80	1.05	33.877
Septiembre	1.05	3.43	4.97	1.07	36.115
Octubre	0.74	1.89	3.04	0.76	14.073
Noviembre	0.40	0.67	1.04	0.42	2.766
Diciembre	0.35	0.54	0.79	0.37	1.978

Tr = 15					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[W]
Enero	0.47	0.88	1.43	0.49	4.220
Febrero	0.38	0.63	0.95	0.40	2.485
Marzo	0.40	0.68	1.05	0.42	2.808
Abril	0.54	1.11	1.84	0.56	6.077
Mayo	0.76	1.95	3.13	0.78	14.903
Junio	1.03	3.32	4.84	1.05	34.296
Julio	1.05	3.39	4.92	1.07	35.691
Agosto	1.00	3.13	4.62	1.02	31.395
Septiembre	1.02	3.26	4.77	1.04	33.352
Octubre	0.72	1.77	2.87	0.74	12.827
Noviembre	0.38	0.61	0.92	0.40	2.406
Diciembre	0.33	0.50	0.72	0.35	1.738

Tr = 50					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.57	1.22	2.02	0.59	7.038
Febrero	0.46	0.85	1.38	0.48	3.993
Marzo	0.49	0.94	1.54	0.51	4.689
Abril	0.66	1.52	2.50	0.68	10.113
Mayo	0.88	2.52	3.87	0.90	22.269
Junio	1.15	3.99	5.61	1.18	45.981
Julio	1.14	3.92	5.53	1.17	44.783
Agosto	1.11	3.76	5.35	1.14	41.834
Septiembre	1.15	3.98	5.60	1.18	45.864
Octubre	0.83	2.27	3.55	0.85	18.930
Noviembre	0.46	0.84	1.36	0.48	3.947
Diciembre	0.40	0.68	1.05	0.42	2.808

- Generación de energía y potencia a partir de los caudales del método Racional, Sección B

Tr = 2					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.24	0.31	0.38	0.27	0.832
Febrero	0.23	0.3	0.36	0.27	0.780
Marzo	0.23	0.3	0.36	0.27	0.780
Abril	0.34	0.53	0.77	0.36	1.892
Mayo	0.57	1.19	1.98	0.59	6.863
Junio	0.9	2.63	4.02	0.92	23.762
Julio	0.97	2.99	4.45	0.99	29.101
Agosto	0.88	2.5	3.85	0.90	22.089
Septiembre	0.87	2.46	3.79	0.89	21.494
Octubre	0.55	1.14	1.89	0.57	6.353
Noviembre	0.22	0.28	0.33	0.26	0.704
Diciembre	0.19	0.23	0.24	0.24	0.534

Tr = 10					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.43	0.75	1.18	0.45	3.312
Febrero	0.39	0.66	1.01	0.41	2.664
Marzo	0.41	0.71	1.11	0.43	2.998
Abril	0.56	1.17	1.94	0.58	6.634
Mayo	0.79	2.11	3.34	0.81	16.758
Junio	1.1	3.71	5.30	1.12	40.907
Julio	1.13	3.85	5.45	1.16	43.600
Agosto	1.07	3.51	5.07	1.09	37.651
Septiembre	1.09	3.62	5.19	1.11	39.553
Octubre	0.75	1.93	3.10	0.77	14.561
Noviembre	0.39	0.64	0.98	0.41	2.583
Diciembre	0.34	0.52	0.75	0.36	1.858

Tr = 5					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.36	0.56	0.83	0.38	2.103
Febrero	0.33	0.51	0.73	0.35	1.774
Marzo	0.34	0.53	0.77	0.36	1.892
Abril	0.47	0.89	1.45	0.49	4.267
Mayo	0.7	1.71	2.78	0.72	12.055
Junio	1.02	3.25	4.76	1.04	33.248
Julio	1.06	3.48	5.03	1.08	36.987
Agosto	0.99	3.07	4.55	1.01	30.487
Septiembre	1	3.12	4.61	1.02	31.294
Octubre	0.67	1.59	2.60	0.69	10.738
Noviembre	0.33	0.49	0.70	0.35	1.705
Diciembre	0.28	0.4	0.54	0.31	1.207

Tr = 15					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.47	0.88	1.43	0.49	4.220
Febrero	0.38	0.63	0.95	0.40	2.485
Marzo	0.40	0.68	1.05	0.42	2.808
Abril	0.54	1.11	1.84	0.56	6.077
Mayo	0.76	1.95	3.13	0.78	14.903
Junio	1.03	3.32	4.84	1.05	34.296
Julio	1.05	3.39	4.92	1.07	35.691
Agosto	1.00	3.13	4.62	1.02	31.395
Septiembre	1.02	3.26	4.77	1.04	33.352
Octubre	0.72	1.77	2.87	0.74	12.827
Noviembre	0.38	0.61	0.92	0.40	2.406
Diciembre	0.33	0.50	0.72	0.35	1.738

Tr = 20					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.49	0.94	1.54	0.51	4.689
Febrero	0.45	0.82	1.32	0.47	3.775
Marzo	0.47	0.89	1.45	0.49	4.267
Abril	0.64	1.45	2.39	0.66	9.362
Mayo	0.88	2.50	3.85	0.90	22.089
Junio	1.18	4.18	5.82	1.21	49.420
Julio	1.19	4.22	5.86	1.22	50.313
Agosto	1.14	3.94	5.55	1.17	45.015
Septiembre	1.17	4.12	5.75	1.20	48.302
Octubre	0.83	2.27	3.55	0.85	18.930
Noviembre	0.44	0.80	1.28	0.46	3.606
Diciembre	0.39	0.65	0.99	0.41	2.625

Tr = 50					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.57	1.19	1.98	0.59	6.863
Febrero	0.52	1.02	1.69	0.54	5.384
Marzo	0.55	1.13	1.87	0.57	6.298
Abril	0.73	1.82	2.94	0.75	13.370
Mayo	0.98	3.03	4.50	1.00	29.790
Junio	1.28	4.80	6.49	1.31	61.530
Julio	1.27	4.71	6.40	1.30	59.902
Agosto	1.24	4.52	6.19	1.27	56.138
Septiembre	1.28	4.78	6.48	1.31	61.267
Octubre	0.92	2.72	4.13	0.94	25.116
Noviembre	0.51	1.01	1.67	0.53	5.233
Diciembre	0.45	0.81	1.30	0.47	3.730

- Generación de energía y potencia a partir de los caudales del método HMS-SCS, Sección A

Tr = 2					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Febrero	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Marzo	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Abril	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Mayo	0.68	1	2.62	0.69	6.738
Junio	1.36	3.7	7.05	1.37	49.829
Julio	1.51	4.5	8.12	1.53	67.289
Agosto	1.3	3.4	6.63	1.31	43.768
Septiembre	1.28	3.3	6.49	1.29	41.826
Octubre	0.68	1	2.62	0.69	6.738
Noviembre	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Diciembre	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564

Tr = 5					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Febrero	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Marzo	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Abril	0.56	0.7	1.92	0.57	3.889
Mayo	0.95	1.9	4.34	0.96	17.873
Junio	1.63	5.2	9.13	1.65	83.917
Julio	1.71	5.8	9.99	1.73	98.185
Agosto	1.54	4.7	8.39	1.56	71.678
Septiembre	1.58	4.9	8.71	1.60	76.655
Octubre	0.9	1.7	3.99	0.91	15.150
Noviembre	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Diciembre	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564

Tr = 10					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.47	0.5	1.40	0.48	2.335
Febrero	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Marzo	0.47	0.5	1.40	0.48	2.335
Abril	0.68	1	2.62	0.69	6.738
Mayo	1.13	2.6	5.46	1.14	29.090
Junio	1.78	6.4	10.98	1.80	112.741
Julio	1.81	6.7	11.41	1.83	120.013
Agosto	1.71	5.8	9.99	1.73	98.185
Septiembre	1.75	6.1	10.50	1.77	105.656
Octubre	1.06	2.3	5.00	1.07	24.138
Noviembre	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Diciembre	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050

Tr = 15					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[W]
Enero	0.51	0.60	1.67	0.52	3.038
Febrero	0.47	0.50	1.40	0.48	2.335
Marzo	0.51	0.60	1.67	0.52	3.038
Abril	0.78	1.30	3.24	0.79	10.043
Mayo	1.24	3.10	6.20	1.25	38.063
Junio	1.85	7.10	11.95	1.87	129.990
Julio	1.87	7.30	12.22	1.89	135.097
Agosto	1.79	6.50	11.12	1.81	115.146
Septiembre	1.83	6.90	11.69	1.85	124.960
Octubre	1.15	2.70	5.61	1.16	30.745
Noviembre	0.47	0.50	1.40	0.48	2.335
Diciembre	0.41	0.40	1.10	0.42	1.634

Tr = 20					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.57	0.70	1.99	0.58	3.954
Febrero	0.52	0.60	1.73	0.53	3.094
Marzo	0.57	0.70	1.99	0.58	3.954
Abril	0.82	1.40	3.53	0.83	11.362
Mayo	1.32	3.40	6.78	1.33	44.415
Junio	1.90	7.60	12.75	1.92	142.878
Julio	1.91	7.70	12.87	1.93	145.523
Agosto	1.85	7.00	12.00	1.87	128.115
Septiembre	1.90	7.50	12.62	1.92	140.990
Octubre	1.21	2.90	6.05	1.22	34.725
Noviembre	0.52	0.60	1.73	0.53	3.094
Diciembre	0.42	0.40	1.14	0.43	1.671

Tr = 50					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.51	1.00	1.65	0.53	5.182
Febrero	0.44	0.80	1.28	0.46	3.606
Marzo	0.51	1.00	1.65	0.53	5.182
Abril	0.79	2.10	3.33	0.81	16.677
Mayo	1.25	4.60	6.28	1.28	57.590
Junio	1.77	9.40	10.83	1.81	166.609
Julio	1.76	9.10	10.56	1.80	160.351
Agosto	1.72	8.60	10.08	1.76	148.106
Septiembre	1.77	9.30	10.75	1.81	164.814
Octubre	1.13	3.90	5.51	1.16	44.170
Noviembre	0.44	0.80	1.28	0.46	3.606
Diciembre	0.37	0.60	0.90	0.39	2.309

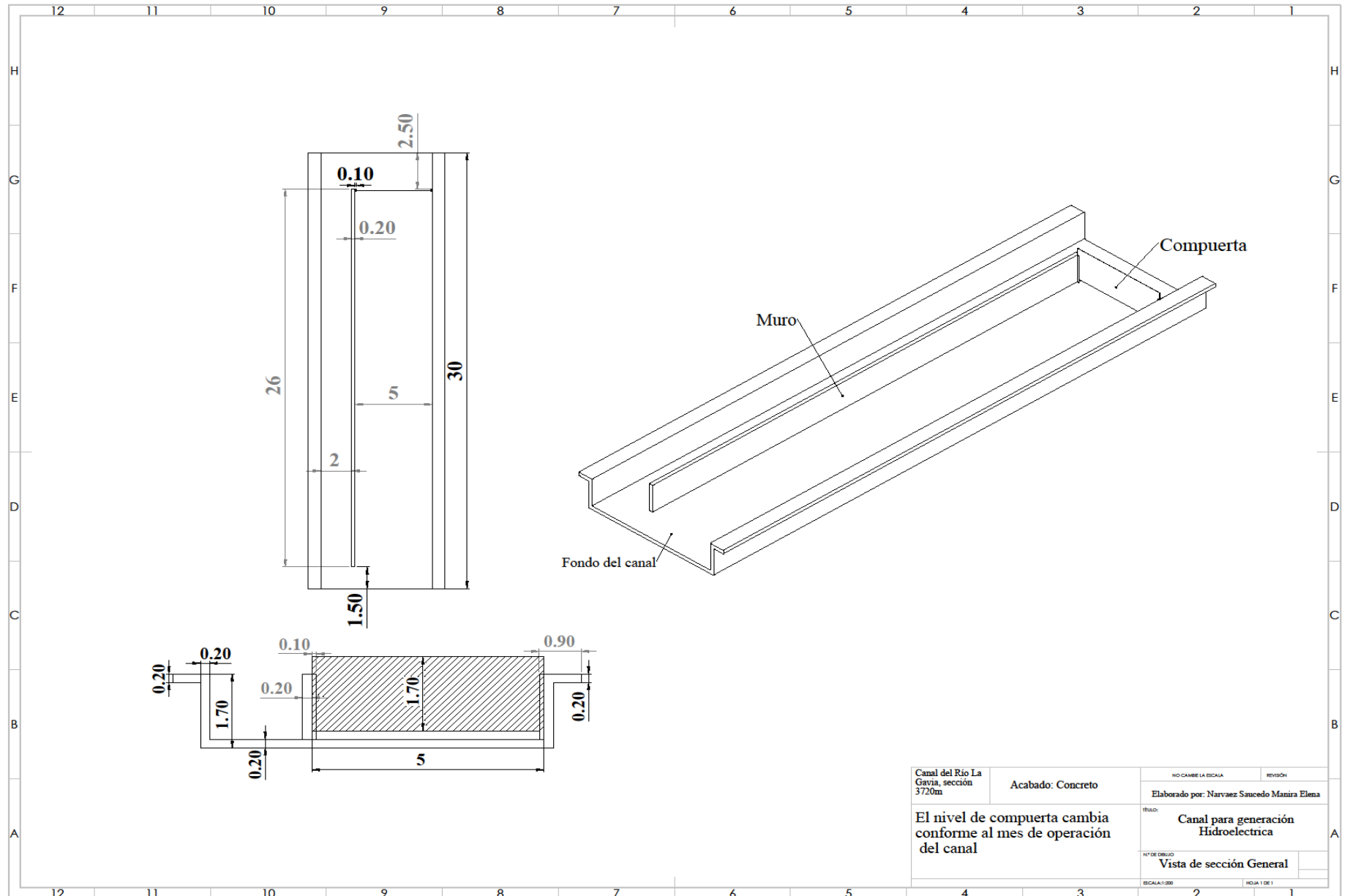


- Generación de energía y potencia a partir de los caudales del método HMS-SCS, Sección B

Tr = 2					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Febrero	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Marzo	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Abril	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Mayo	0.74	1.2	3.04	0.75	8.797
Junio	1.51	4.5	8.12	1.53	67.289
Julio	1.67	5.5	9.57	1.69	90.931
Agosto	1.43	4.1	7.59	1.44	58.062
Septiembre	1.42	4	7.46	1.43	56.245
Octubre	0.74	1.2	3.04	0.75	8.797
Noviembre	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Diciembre	0.28	0.2	0.51	0.29	0.564
Tr = 10					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.51	0.6	1.67	0.52	3.038
Febrero	0.47	0.5	1.40	0.48	2.335
Marzo	0.51	0.6	1.67	0.52	3.038
Abril	0.74	1.2	3.04	0.75	8.797
Mayo	1.24	3.1	6.20	1.25	38.063
Junio	1.9	7.7	12.70	1.92	144.805
Julio	1.94	8.2	13.28	1.96	157.479
Agosto	1.85	7.1	11.95	1.87	129.990
Septiembre	1.88	7.4	12.34	1.90	137.683
Octubre	1.15	2.7	5.61	1.16	30.745
Noviembre	0.47	0.5	1.40	0.48	2.335
Diciembre	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Tr = 20					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.64	0.90	2.40	0.65	5.709
Febrero	0.56	0.70	1.92	0.57	3.889
Marzo	0.60	0.80	2.17	0.61	4.759
Abril	0.90	1.70	3.99	0.91	15.150
Mayo	1.45	4.20	7.72	1.47	60.310
Junio	2.02	9.30	14.44	2.04	186.052
Julio	2.02	9.40	14.55	2.04	188.065
Agosto	1.96	8.50	13.61	1.98	164.944
Septiembre	2.00	9.10	14.24	2.02	180.238
Octubre	1.34	3.60	6.91	1.35	47.769
Noviembre	0.56	0.70	1.92	0.57	3.889
Diciembre	0.47	0.50	1.40	0.48	2.335

Tr = 5					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Febrero	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Marzo	0.41	0.4	1.10	0.42	1.634
Abril	0.6	0.8	2.17	0.61	4.759
Mayo	1.03	2.2	4.83	1.04	22.437
Junio	1.77	6.3	10.82	1.79	110.360
Julio	1.84	7	11.83	1.86	127.463
Agosto	1.71	5.8	9.99	1.73	98.185
Septiembre	1.73	5.9	10.18	1.75	101.031
Octubre	0.98	2	4.51	0.99	19.407
Noviembre	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Diciembre	0.35	0.3	0.81	0.36	1.050
Tr = 15					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.56	0.70	1.92	0.57	3.889
Febrero	0.51	0.60	1.67	0.52	3.038
Marzo	0.56	0.70	1.92	0.57	3.889
Abril	0.84	1.50	3.63	0.85	12.477
Mayo	1.36	3.70	7.05	1.37	49.829
Junio	1.97	8.60	13.72	1.99	167.739
Julio	1.99	8.90	14.05	2.01	175.373
Agosto	1.92	7.90	12.94	1.94	150.135
Septiembre	1.95	8.40	13.50	1.97	162.168
Octubre	1.26	3.20	6.35	1.27	39.924
Noviembre	0.51	0.60	1.67	0.52	3.038
Diciembre	0.41	0.40	1.10	0.42	1.634
Tr = 50					
Mes	Tirante	Caudal	Área húm	E <sub>s</sub>	P
	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[kW]
Enero	0.74	1.20	3.04	0.75	8.797
Febrero	0.68	1.00	2.62	0.69	6.738
Marzo	0.71	1.10	2.84	0.72	7.737
Abril	1.10	2.50	5.31	1.11	27.230
Mayo	1.69	5.60	9.71	1.71	93.689
Junio	2.15	11.40	16.45	2.17	242.962
Julio	2.13	11.10	16.17	2.15	234.342
Agosto	2.09	10.40	15.53	2.11	215.368
Septiembre	2.15	11.40	16.45	2.17	242.962
Octubre	1.56	4.80	8.53	1.58	74.150
Noviembre	0.64	0.90	2.40	0.65	5.709
Diciembre	0.56	0.70	1.92	0.57	3.889

### *Anexo 8: Plano de construcción del canal*



## Anexo 9: Ficha técnica de turbina smart free stream



### TURBINA SMART FREE STREAM



#### SMART FREE STREAM

Esta turbina es instalada en el lecho del río o canal. Especialmente apropiada para ser instalada en conductos o detrás de plantas hidroeléctricas tradicionales.

- Muy compacta
- Suministro de carga base confiable para lugares con baja incidencia de escombros
- Casi no requiere mantenimiento



Suministro de energía básico



Fácil instalación y mantenimiento



Necesidad mínima de espacio



Bajos costes de infraestructura (no represas)



Nulo impacto ambiental



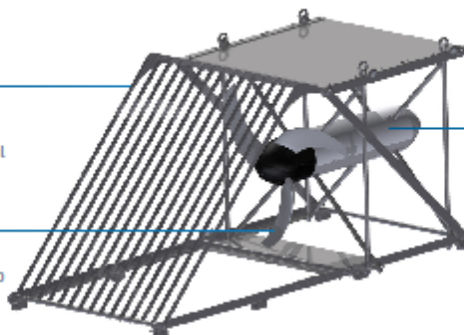
Mínima perturbación sonora

#### Protección ante residuos flotantes

Cables de acero inoxidable cuidadosamente diseñados de tal manera que los residuos no se acumulen ni dañen las aspas

#### Rotor

aspas ligeramente curvadas dirigidas a mejorar el rendimiento contra residuos y palizadas



#### Generador subacuático de 5kW

generador de imán permanente provee corriente alterna trifásica

Potencia	250 – 5000 W
Dimensiones	Longitud: 2640 mm Ancho: 1120 mm Altura: 1120 mm
Velocidad rotacional	90 – 230 rpm
Peso	300 kg
Numero de aspas del rotor	3
Rotor ø	1000 mm

#### Características:

- Generador acuático con imán permanente genera corriente alterna
- Sistema ampliable con varias turbinas
- Disponible como sistema aislado, solución conectada a la red y versión híbrida
- Volumen de suministro y especificaciones pueden ser adaptados para proyectos especiales
- Potencia nominal a 3.1 m/s
- La turbina se instala al fondo del río/canal

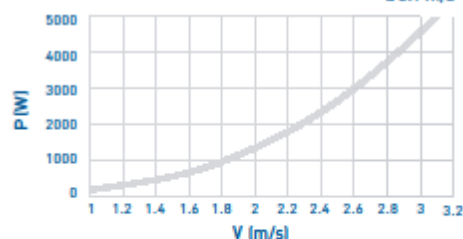
#### Anclaje depende de:

- Características hidrológicas (por ejemplo: tipo de lecho de río: roca, arena, etc.)
- Tránsito fluvial, kayak, turismo
- Cantidad y tipo de residuos flotantes/palizadas

#### Requisitos:

- Profundidad mínima del río: 1.1 m
- Ancho mínimo del río: 1.2 m
- Punto de inyección: máx. 500 metros de distancia de la turbina

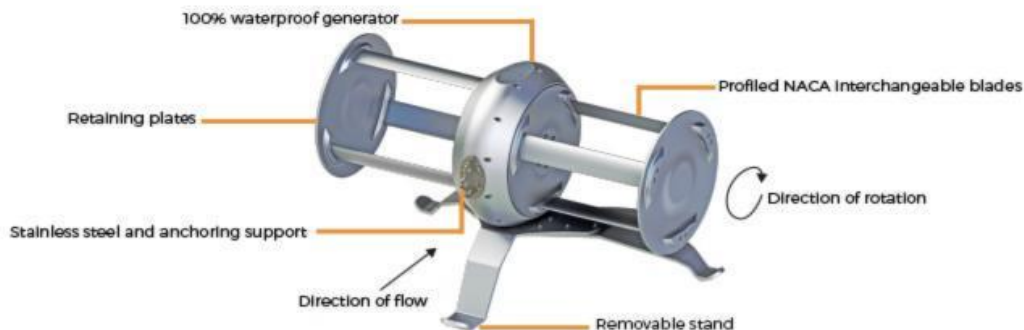
#### Curva de potencia del generador Potencia nominal a 3.1 m/s



Curva de potencia obtenida durante una prueba en el Instituto SVA, Potsdam. Los resultados pueden variar dependiendo las condiciones del agua del río.

## Anexo 10: Ficha técnica de turbina indérge

# River Turbine Specifications



### Technical Specifications

Turbine	Darrius double Zero debris concept™
Axis	Horizontal
Height	66 cm - 26 in
Width	132 cm - 52 in
Weight	131 kg - 291 lbs
Total Surface Area	0,40 m <sup>2</sup> - 4.3 sq ft*
Materials	Aluminum Stainless steel

\*Varies according to blade lenght

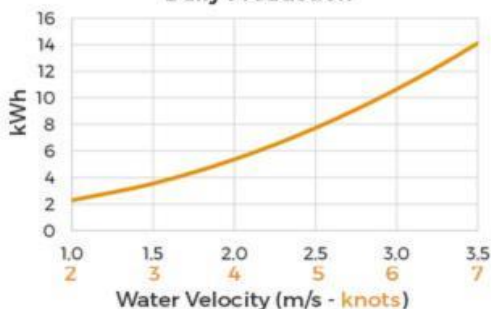
### Performance Ratings

Rated Power Output	100 - 500 W
Minimum velocity	1.0 m/s - 2 knots
Maximum velocity	3.5 m/s - 7 knots
Rated RPM	100 to 250 RPM

### Annual energy production

1.0 m/s - 2 knots	900 kWh
2.0 m/s - 4 knots	2000 kWh
3.0 m/s - 6 knots	4000 kWh
3.5 m/s - 7 knots	5100 kWh

Daily Production



### Electrical Configuration

**Generator** Three-phase permanent magnet  
Shaftless drive 100% waterproof  
Integrated AC-DC converter  
Embedded variable speed drive  
Rated output = 125 V DC

**DC-DC Converter** Included with Turbine  
Bluetooth and remote monitoring  
Rated output = 24 V or 48 V DC

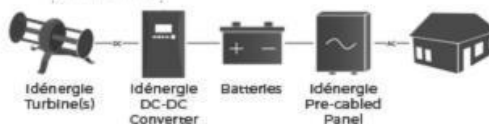
**Software updates** Periodically available

**Certifications** CSA/UL/CE 2016-2017

### Installation Examples

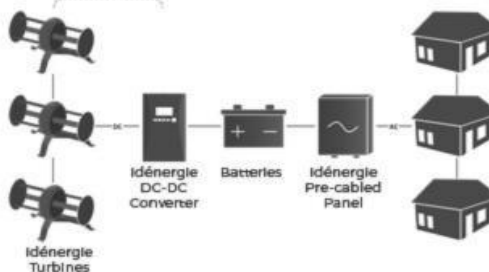
#### Residential installation

1 km - 0.6 miles maximum



#### Network installation

1 km - 0.6 miles maximum



**Idénergie Inc.**  
8340 rue Labarre  
Montréal (Québec) H4P 2E7  
Canada

**Contact us**  
[www.idenergie.ca](http://www.idenergie.ca)  
+1 514 225-6896  
1-855-654-7777

# GLOSARIO

## 1 Abatimiento

Es el descenso del agua subterránea, debido a la sobreexplotación

## 2 Acuífero

Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo.

## 3 Afluente

Afluente Río, arroyo o curso secundario de agua que desemboca en otro mayor.  
Sinónimo de tributario (CONANP, 2006).

## 4 Agua renovable

El agua es un recurso natural renovable, es decir que puede ser obtenido a través de procesos naturales tal como el ciclo hidrológico de cual alguna de ésta agua es depositada en acuíferos con periodos de renovación largos por lo que se les considera no renovables.

## 5 Arroyo

Curso de agua, generalmente pequeño o en formación, de escurrimiento permanente o intermitente

## 43 Avenida

Elevación de los niveles de agua en el cauce a valores no usuales

## 6 Avenidas

Aumento del nivel y gasto de agua en un río o arroyo a causa de las precipitaciones pluviales o el derretimiento rápido de la nieve en la parte alta de la cuenca.

## 7 Ciclo hidrológico

Es el proceso de circulación del agua entre los distintos componentes de la hidrósfera.

## 8 Ciénega

Tierra baja que soporta inundaciones estacionales o permanentes y presenta plantas más leñosas que un estero y mayor drenaje que una turbera.

## 9 Cuenca

Extensión de terreno delimitada por partes altas que recoge el agua de lluvia o manantiales, alimentando con ella el caudal de los ríos, arroyos o lagos que se encuentran dentro de él

## 10 Cuencas hidrológicas

Es la unidad del territorio, normalmente delimitada por un parte aguas aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior.

## 11 Discretización

Es la operación que permite separar en clases una serie de "variables cualitativas » o de «variables cuantitativas».

## 12 Energías limpias

Aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad, cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan

## 13 Energías renovables

Aquellas que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica.

## 14 Escorrentía

Agua que fluye sobre la superficie del terreno como resultado de la caída de lluvia o el deshielo.

## 15 Estiaje

Nivel más bajo o caudal mínimo que en ciertas épocas del año tienen las aguas de un río, estero, laguna, por causa de la sequía.

## 16 Evaluación de impacto ambiental

Es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidas en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente (Art. 28 de la LGEEPA ).

## 17 Evapotranspiración

Es la cantidad de agua que se transfiere de la superficie de la Tierra a la atmósfera. Se forma por la evaporación del agua líquida o sólida y de la transpiración de las plantas, animales y los seres humanos.

**18 Fluido**

Un material que, cuando se corta, se deforma continuamente en el tiempo durante el periodo en que se aplican las fuerzas de corte.

**19 Flujo**

Movimiento de un fluido

**20 Geoestadística**

Es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra.

**21 Geomorfología**

La Geomorfología es la ciencia que estudia las formas de la Tierra y los procesos que influyen sobre ellas y las modifican.

**22 Hidrografía**

Parte de la geografía física que se ocupa de la distribución del agua sobre la superficie terrestre y sus propiedades.

**23 Índice de humedad de Lang**

Es un estimador de eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura, considerado como un índice de humedad o aridez, según se interprete.

**24 Infiltración**

Cuando el agua penetra al subsuelo y es gradualmente conducida a capas más profundas, pudiendo penetrar a través de los mantos rocosos subterráneos, pasando entre sus pequeñas grietas.

**25 Lago**

Depresión de la superficie terrestre, de mayor o menor extensión, que da forma a un gran cuerpo de agua estancada, dulce o salada, que posee una corriente inapreciable.

**27 Lomerio**

Relieve que se origina por la disección de una planicie inclinada o por nivelación de montañas, y que se traduce en pequeñas elevaciones del terreno con configuración suave.

**28 Métodos de sondeo**

Tipo de prospección manual o mecánica, pertinente a las técnicas de reconocimiento geotécnico del terreno.

**45 Modelo digital de elevaciones**

Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar

**44 Orden de red hídrica**

Proporciona la información necesaria para determinar la corriente principal de cada afluente

**30 Periodo de retorno**

Se define como el intervalo de recurrencia ( $T_r$ ), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada.

**46 Periodo de retorno**

Intervalo de recurrencia, al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor magnitud dada

**31 Pluviógrafo**

Pluviómetro que dispone de un registro cronológico de las alturas de agua de precipitación.

**32 Pluviómetro**

Instrumento que se utiliza para medir la cantidad de precipitación. Se mide en milímetros, equivalente a la altura que alcanzaría 1 litro de agua vertido en una superficie de 1 m.

**33 Precipitación efectiva**

Es la proporción de la precipitación que puede llegar a estar disponible en la zona ocupada por las raíces de las plantas, la que utiliza para satisfacer sus requerimientos de agua.

**34 Presa o embalse**

Barrera a través de un río, provista de compuertas u otros mecanismos de control para controlar el nivel de agua de superficie que se encuentra aguas arriba.

**35 Región Hidrológica**

Área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos.

**36 Región hidrológico-administrativa**

Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y el municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país.

**37 Río**

Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar

**38 Sierra**

Conjunto de montañas o subconjunto por estar dentro de otro conjunto más grande, como es una cordillera cuya línea de cumbres tiene forma aserrada o quebrada, bastante pronunciada.

**39 Sistema ambiental**

Es un conjunto de elementos bióticos, abióticos y socioeconómicos que interactúan en el espacio geográfico del proyecto, y donde se manifiestan sus impactos ambientales.

**41 Tiempo de concentración**

Representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa, es decir el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que; con una intensidad de escorrentía constante; se alcance el caudal máximo.

**42 Turbina hidráulica**

Turbo maquina en la cual energía se extrae mediante la flecha rotatoria, referida al fluido de trabajo, en este caso agua.